

# RAPPORT DE CONJONCTURE

du Comité National de la Recherche Scientifique



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

# RAPPORT DE CONJONCTURE

du Comité National de la Recherche Scientifique

# 1992



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

15, QUAI ANATOLE FRANCE 75700 PARIS-TEL [1] 47 53 15 15 • TELECOPIE [1] 44 18 70 46

## **Introduction**

*Tous les quatre ans, le Comité national analyse la conjoncture scientifique, évalue les forces et faiblesses de la recherche au CNRS et en France, sa situation internationale, et dégage des perspectives.*

*En 1989, le CNRS avait inauguré une nouvelle démarche pour l'élaboration et la présentation de ce Rapport de conjoncture. Il avait pris le parti de sortir du cloisonnement des disciplines et d'organiser la réflexion autour de thèmes interdisciplinaires.*

*Le résultat fut à la hauteur des efforts fournis par ceux qui ont participé à cet exercice : le Rapport de conjoncture 1989 est devenu une référence en matière de réflexion scientifique.*

*En 1992, après le profond renouvellement du Comité national de 1991, il nous a paru important de lancer l'élaboration d'un nouveau Rapport de conjoncture sur les mêmes bases que précédemment. Cette fois, nous ne partions pas de rien, et la réflexion antérieure ainsi que l'expérience acquise ont été précieuses pour envisager le nouvel exercice avec sérénité.*

*la plupart des thèmes de réflexion du précédent rapport ont été repris avec toutefois des modifications de leur intitulé, certains thèmes ont été abandonnés, de nouveaux sont apparus, tout cela exprimant l'évolution normale des sciences et des grands domaines d'intérêt scientifique.*

*Comme précédemment, les sections du Comité national ont supporté le principal de l'effort de réflexion en déléguant des experts scientifiques*



*dans les vingt-quatre groupes thématiques. Les présidents des groupes ont eu la difficile tâche d'organiser les échanges et les débats entre les experts n'ayant parfois pas le même langage et, enfin de réflexion, de coordonner la rédaction ou de l'assumer entièrement. Les sections du Comité national ont également eu à discuter des différents rapports les concernant et d'en proposer des modifications, au cours de la session d'automne 1992. Enfin, un comité de lecture, émanation du Conseil scientifique du CNRS, a bien voulu accepter la charge de superviser la rédaction de l'ensemble des rapports pour assurer une cohérence au document final.*

*Je remercie tous ceux qui ont accepté de participer à ce travail, et tout particulièrement les présidents des groupes, les rédacteurs et les membres des groupes qui ont consacré beaucoup de temps pour mener à bien ce projet. Je remercie également les membres du Comité de lecture et surtout Michel Crozon qui a eu la lourde tâche d'animer cette réflexion, ainsi que Sames Sicsic qui en a été le coordonnateur.*

**François Kourilsky**  
Directeur général du CNRS  
Décembre 1992

# ***Avant-propos***

*Nous ne saurions trop recommander la lecture de l'avant-propos du précédent Rapport de conjoncture du Comité national de la recherche scientifique, publié en 1989 : les observations et remarques qu'il contient restent d'une totale actualité. Le présent texte vise plus à le compléter qu'à se substituer à lui.*

## **PRÉSENTATION**

### ***d'écriture***

C'est en 1988 que, pour la première fois, le Comité national, à la demande du Directeur général, a entrepris la rédaction d'un rapport de conjoncture organisé par thèmes et non pas, comme les années précédentes, par discipline, chacune correspondant alors à une section du Comité national. Le changement, bien entendu, n'était pas de pure forme. Passer d'une logique de discipline à une logique thématique, le nombre de thèmes étant bien inférieur à celui des sections, oblige celles-ci à se fédérer pour adopter un parti pluridisciplinaire. Se rencontrant dans des groupes de travail, les chercheurs de spécialités différentes sont incités à rechercher les terrains communs, à prendre en compte les marges de leur domaines et non seulement les strictes orthodoxies et les paradigmes dominants. On sait que, souvent, ce sont ces marges qui engendrent les idées originales, le renouvellement des problématiques. Bien sûr, il ne suffit pas de mettre les gens ensemble pour que d'emblée jaillisse la lumière, la problématique féconde. Surtout si le but poursuivi est la simple rédaction d'un rapport ! Il n'empêche que de tels contacts doivent, à terme, porter des fruits : aux membres des groupes de travail, ils donnent l'occasion de sortir de leurs habi-

rudesse de langage et de connivence disciplinaire, ils les obligent à rechercher des terrains de rencontre, à prendre du recul, à se mettre quelque peu à la place de l'autre. Aux autres chercheurs, ceux qui se contenteront de lire et, dans le meilleur cas, de discuter un rapport auquel ils n'auront pas eux-mêmes contribué, l'apport est plus subtil : établi par leurs pairs - ceux-là mêmes qui, membres du Comité national, auront à évaluer leurs travaux -, ce rapport devient une sorte d'incitation à la débauche disciplinaire, une légitimation de la curiosité hors des limites strictes de leur champ scientifique.

Il ne faut certes pas idéaliser l'exercice : tel est parfaitement capable de prôner l'interdisciplinarité qui, dans son propre laboratoire, empêchera impitoyablement les chercheurs de s'aventurer hors d'étroites limites d'orthodoxie. Il n'en reste pas moins que, neuve et toute théorique il y a quelques années, la conception multidisciplinaire des champs de recherche a pris une consistance institutionnelle dans de nombreux programmes, et a fait son chemin dans les esprits. Notamment, il est apparu que les sections de Sciences humaines et sociales se sont très largement impliquées dans de nombreux thèmes, même très techniques. Cela correspond, semble-t-il, à la prise de conscience généralisée des implications sociales des sciences et des techniques. Sans doute aussi l'usage accru des modèles et des outils informatiques jusque-là spécifiques des "sciences dures" donne-t-il aux SHS le sentiment d'une plus grande parenté avec les autres sciences.

### ***Comment cela s'est-il passé ?***

Le Conseil scientifique du CNRS, instance émanant du Comité national, a décidé à la fin de 1991 et sur la proposition du Directeur Général, de confier à l'un de ses membres de l'époque, Michel Crozon, avec la collaboration de Sames Sicsic et conseillé par un Comité de lecture, la coordination d'une nouvelle version du rapport. Après le renouvellement du Conseil scientifique, en 1992, le Comité de lecture a été renouvelé,

Le précédent rapport portait sur 22 thèmes, de *"Univers, noyaux, particules"* à *"Simulation, formalisation appliquées à l'étude des phénomènes sociaux"*. Tenant compte des redondances et des lacunes du rapport 1989, nous avons proposé une liste de thèmes très largement inspirée de la précédente, à laquelle il nous a semblé opportun d'ajouter deux thèmes très généraux, intitulés

respectivement; *"Les outils de la recherche ; instruments, technologies"* et *"Les outils de la recherche : modélisation, simulation, moyens informatiques"*<sup>11</sup>. Ainsi 24 thèmes ont été soumis aux présidents de commissions et aux directeurs scientifiques du CNRS, et la liste finale des intitulés a été établie en tenant compte autant que possible de leurs réactions.

24 groupes de travail ont donc été mis en place. Leurs membres ont été désignés librement par les commissions du Comité national qui choisissaient elles-mêmes les thèmes auxquels elles désiraient contribuer. Le vœu de pluridisciplinarité a été largement respecté ; chaque groupe de travail comportait des membres nommés par plusieurs commissions.

Les présidents choisis par les groupes de travail ont eu à faire respecter un calendrier assez serré : désignés en février 1992, ils devaient rendre une première copie à la fin de juin. Par la suite, ils devaient intégrer dans une seconde version les remarques communiquées par le Comité de lecture ainsi que par les sections du Comité national, tout cela devant être achevé avant la fin de novembre 1992 en vue d'une discussion finale par le conseil scientifique dans sa séance du 17 décembre,

Ce calendrier a, dans l'ensemble, été respecté sans trop d'anicroches \*. Il convient ici de saluer le travail accompli par les divers auteurs de cette œuvre collective : malgré les contraintes de leurs activités personnelles, recherche, enseignement, nombreux sont, ceux qui ont accepté d'y consacrer un temps considérable. Que plusieurs centaines de personnes aient décidé de s'impliquer dans un tel travail collectif témoigne de l'intérêt qu'il soulève et des liens étroits qui régissent au CNRS.

### ***Présentation et limites***

Une grille de travail a été proposée aux rédacteurs. Sans être contraignante, elle recommandait, pour chaque thème, d'en préciser les enjeux, l'état des connaissances et des recherches en cours, de situer les contributions du CNRS et des autres organismes français de recherche par rapport à l'Europe et au reste

\* Le groupe qui avait la responsabilité du thème *"Transformation des sociétés, développement"* n'ayant malheureusement pas pu respecter le calendrier proposé, son rapport sera publié séparément à une date ultérieure.

du monde, d'indiquer les directions prometteuses et de proposer des actions utiles pour le développement et l'amélioration des recherches. En général, les recommandations de cette grille ont été prises en compte, mais cela ne se manifeste pas, dans les rapports, par un plan uniforme. Selon les cas, ces différents aspects apparaissent disséminés dans les divers sous-thèmes traités successivement dans un même thème, ou bien au contraire ils forment le principe d'organisation du texte, et il existe aussi des cas intermédiaires. Cette variété traduit la diversité des approches des thèmes considérés et la plus ou moins grande homogénéité atteinte par les groupes de travail, ainsi que la volonté unificatrice des responsables de groupes. Aux responsables de l'ensemble de ce rapport, il a paru légitime (et les rédacteurs en ont été avertis) de rassembler en un document unique toutes les recommandations d'ordre général concernant la carrière et l'évaluation des chercheurs, les questions de rémunération et de crédits de fonctionnement, voire d'organisation pratique du CNRS : on évite ainsi des redites fastidieuses n'ayant qu'un rapport second avec le contenu des thèmes. Ces recommandations figurent, dans la présente introduction, sous l'intitulé *"L'environnement du chercheur"*.

La lecture des centaines de pages souvent compactes de ce rapport peut parfois, en dépit du remarquable effort de composition et de mise en page accompli par l'Atelier de récrit, paraître d'un abord difficile. En particulier, certains chapitres contiennent des énumérations assez longues de sujets et de champs de recherche, chaque tendance, chaque école voulant être au moins mentionnée. Sans doute est-ce en partie dû au temps trop bref qui n'a pas permis un travail d'unification. Mais il faut surtout y voir l'expression de la richesse et de la diversité des champs de la recherche scientifique aujourd'hui, celle des équipes du CNRS en particulier. Vouloir enfermer l'essentiel des fronts de la science vivante dans 24 thèmes est une sorte de pari impossible, nécessaire certes pour aboutir à un document maniable et pouvant être intellectuellement appréhendé, mais qui se heurte à l'incroyable diversité des voies d'approche de la réalité. Ces énumérations sont donc aussi, un signe de richesse, et le témoignage de la conviction qu'ont les chercheurs de l'importance des travaux qu'ils mènent.

Si Ton prend un peu de recul, c'est la variété des initiatives, des méthodes, des curiosités qui caractérise ce panorama de la recherche : toute politique scientifique doit avoir le souci - en dépit de la nécessité des choix et des priorités de la société - de préserver une telle diversité qui, seule, permet aux idées nouvelles de jaillir, aux individus de donner le meilleur d'eux-mêmes.



Bien sûr, ce document ne couvre pas de façon également, fouillée tous les champs de la recherche, même fondamentale : d'autres organismes que le CNRS contribuent de façon majeure à la recherche dans certains domaines spécialisés. Il n'empêche que, somme toute, de très nombreux secteurs de la recherche sont traités, au moins sommairement, ce qui exauce en partie le vœu de Frédéric Joliot qui voulait que le Comité national soit, pour la France, "le parlement de la science".

L'ordre dans lequel sont présentés les rapports est assez arbitraire et n'a que de lointains rapports avec le classement d'Auguste Comte. Cela n'implique, bien entendu aucune prise de position sur une quelconque hiérarchie des savoirs.

## LES CONTENUS

Il n'est pas question ici, d'inventorier les contenus de documents aussi denses que variés. Leur lecture, pourtant, fait apparaître quelques idées récurrentes qu'il vaut peut-être la peine de mentionner et de développer quelque peu. Elles sont relatives à trois aspects de l'activité de recherche.

### ***Les instruments***

Le prix Nobel récemment attribué à Georges Charpak nous rappelle opportunément une réalité souvent oubliée en France : la qualité de l'instrument conditionne celle de la recherche qu'il permettra. Les différents chapitres du *Rapport de conjoncture* témoignent de la diversité et de l'importance du parc instrumental mis en œuvre dans de nombreuses disciplines : rayons X, lumière synchrotron, laser, RMN, neutrons, microscopes en tous genres, mais aussi bibliothèques, photothèques, lieux de conservation : il n'est pas rare que plusieurs de ces instruments soient nécessaires pour un même sujet, et que ce soit l'innovation instrumentale qui alimente le renouvellement des thèmes. De cette omniprésence des instruments, on peut tirer quelques conséquences :

- Il est nécessaire que soit encouragée une recherche instrumentale de qualité, et que cette activité soit considérée comme une véritable recherche. L'activité du programme Ultimatech va dans ce sens.

- Un inventaire des forces et des faiblesses de l'industrie française dans le domaine de l'instrumentation, une amélioration des relations avec les industriels sont souhaitables.

- Bien utiliser un instrument, savoir pousser ses performances jusqu'aux limites, en perfectionner l'emploi, sont souvent des éléments majeurs de la réussite d'une recherche; il est nécessaire de comprendre le but de la mesure ainsi que le mode de fonctionnement de l'instrument. C'est pourquoi, dans les collaborations entre disciplines, le spécialiste d'instruments doit pouvoir être considéré comme acteur majeur de la recherche et non comme simple prestataire de service (pour les publications comme pour l'évaluation),

- Vu leurs coûts, les instruments mi-lourds ne peuvent être implantés à foison : une politique régionale d'instruments au service des diverses disciplines est sans doute indispensable.

### **la modélisation**

Selon les disciplines, un modèle est un simple schéma descriptif ou classificateur ou bien une théorie élaborée fondée sur une mathématique complexe. L'importance que revêt, dans les rapports, la question des modèles est bien entendu corrélée à la banalisation de l'usage des ordinateurs. Plusieurs font état d'un besoin de formation pour choisir, maîtriser les modèles : les chercheurs ne veulent pas se contenter de boîtes noires intellectuelles.

Une réflexion devrait être menée dans les différents champs disciplinaires pour définir des formations adaptées pour le choix et le transfert de modèles d'une discipline à une autre, pour l'utilisation de certains programmes ou de calculateurs parallèles. On peut aussi imaginer le recrutement de chercheurs à double formation : mathématique ou informatique d'une part, spécialité scientifique d'autre part.

### **Collecte, conservation, gestion**

Objets préhistoriques, graines et plantes, ustensiles, échantillons de roches, documents, manuscrits et autres éléments matériels, mais aussi données numé-

riques sur les planètes et les galaxies, fiches descriptives, données physiques ou chimiques, inventaires, une fois rassemblés et caractérisés regroupés sous forme de bases ou banques de données, deviennent les matériaux de base pour des recherches. Dans certains cas, leur collecte et leur conservation sont assurées par quelques corps spécialisés (conservateurs, bibliothécaires, documentalistes), mais, le plus souvent, seuls des chercheurs sont à même d'opérer les choix, d'élaborer les critères de sélection, les modalités de description pour garantir la pertinence et la qualité de la collecte de ces objets et de ces données.

Collections et banques de données devenant ensuite des corpus à partir desquels s'élabore une recherche, leur collecte et leur gestion sont souvent d'authentiques tâches de recherche qu'on doit considérer comme telles. Des choix qu'on fait aujourd'hui dépendent les thèmes et les résultats de recherche de demain. En parallèle, il est nécessaire que tous les chercheurs apprennent à connaître les moyens d'accès et l'utilisation des différents moyens électroniques d'information et de traitement des données.

## **L'APPARTENANCE DISCIPLINAIRE**

La lecture de ce rapport le montre bien : l'idée interdisciplinaire a fait son chemin. Tous les thèmes comportent des aspects relevant de spécialités variées. Même en mathématiques, les apports de concepts et de problèmes en provenance d'autres disciplines - physique théorique, biologie, mécanique, sciences cognitives, économie,.. - jouent un rôle moteur. De la physique aux sciences humaines, les concepts et les modèles, les instruments et les problématiques circulent plus intensément qu'ils ne l'ont jamais fait.

En conséquence, le chercheur de cette fin de siècle voit son métier changer, et cette évolution nécessaire n'est pas sans poser quelques problèmes qui transparaissent dans de nombreux rapports et qui méritent d'être pris en considération. Ils concernent la structure des laboratoires et des équipes, leur permanence, la question de l'appartenance disciplinaire et de l'évaluation, la formation initiale ou permanente, les différentes facettes du métier. La question peut, de façon sommaire, se formuler ainsi : par sa formation, par sa pratique, un chercheur se sent membre d'une communauté disciplinaire; il est mathématicien, sociologue ou linguiste, avec un champ de compétence plus ou moins

étroit, par exemple géométrie algébrique, particules élémentaires ou langues bantoues...

Dans une recherche thématique, où collaborent des spécialités différentes, un minimum de compréhension commune est requis : ainsi chacun doit sortir de son appartenance disciplinaire stricte, épouser une autre problématique. D'où les difficultés pour une commission monodisciplinaire d'évaluer son travail. Dans de nombreux rapports, cette question est ressentie comme importante, les chercheurs craignant d'être pénalisés dans leur carrière. Le Comité national, avec ses sections, reste l'instance reconnue pour garantir l'appartenance disciplinaire et évaluer les chercheurs, mais il faudrait que, dans ses évaluations, il trouve les moyens de prendre en compte les contributions à d'autres disciplines.

Plus largement, il semble qu'apparaisse un sentiment de double appartenance : appartenance disciplinaire stricte, celle qui légitime le chercheur, appartenance thématique, moins prégnante, concernant le champ de la recherche.

La vie quotidienne des laboratoires n'apparaît guère dans ces textes : cela tient à la problématique utilisée. Pourtant la multiplication des formules de collaboration au sein de projets multidisciplinaires, caractéristique de l'époque actuelle, a pour contrepoids nécessaire l'existence de laboratoires. C'est, en quelque sorte, la niche écologique du chercheur : il s'y forme, il s'y perfectionne, il constitue, avec les ITA, d'étroites associations de compétences, il trouve là les collègues pour mettre à l'épreuve ses idées, vérifier la pertinence et la validité de ses travaux. Ainsi, intégré, il ne risque pas, lors de ses contacts avec d'autres disciplines, de perdre sa compétence au profit d'un vague œcuménisme scientifique. Rappelons en outre que, dans quelques années, un grand nombre de chercheurs embauchés lors des années fastes 1960-1972 vont partir à la retraite, et qu'il faut bien prendre garde à ce que les compétences ne disparaissent pas avec eux et que les jeunes chercheurs qui leur succéderont aient eu le temps d'acquérir une formation solide et plus complète que ce que permet la brève thèse actuelle, étroitement spécialisée : il serait bon de mener autant que possible une politique d'embauche qui évite de trop grandes perturbations liées à ces départs vers la fin du siècle.

Liée aux questions d'appartenance disciplinaire, l'importance de la formation est partout soulignée :

*-formation initiale où une trop étroite spécialisation est considérée comme nuisible : il est important que les jeunes chercheurs, outre leur spécialité, aient*



L'occasion d'acquérir une culture scientifique étendue. Les écoles doctorales qui se mettent en place vont dans ce sens. Plusieurs rapports envisagent même de systématiser les doubles formations initiales, ce qui favoriserait les collaborations;

*-formation permanente* pour tenir compte de l'évolution rapide des techniques, des modèles. En particulier, l'acquisition de compétences techniques nouvelles est une nécessité pour tout chercheur.

En différents passages transparaît l'importance croissante accordée à des aspects de l'activité de recherche longtemps négligés ou considérés comme secondaires, comme la rédaction de publications primaires ou de synthèse, l'organisation de colloques et conférences, la vulgarisation et la diffusion vers des publics variés. Là aussi, un effort doit être fait tant pour la formation à l'expression orale, écrite ou audiovisuelle que pour la prise en compte de ces activités dans l'évaluation des chercheurs.

La question complexe des relations avec la société soulève bien des problèmes. S'il est évident que, bailleuse des fonds et garante du statut et de l'indépendance intellectuelle, la société a le droit légitime d'être écoutée dans ses demandes et informée des résultats, il apparaît que le dialogue n'est pas toujours facile, notamment avec des médias dont les préoccupations coïncident rarement avec le souci de méthode et de prudence scientifique. Cela mérite réflexion.

## **L'ENVIRONNEMENT DU CHERCHEUR**

Les problèmes de carrière, embauche, évaluation, passage de grade sont un souci assez général des différents rapports.

Les bas salaires des débuts de carrière ainsi que la lenteur des avancements font redouter une difficulté de recrutement des meilleurs, attirés par les salaires de l'industrie, et en conséquence une baisse de la qualité de la recherche au CNRS. Certains rapports relèvent le manque de clarté des objectifs des départements scientifiques au travers de l'affichage des postes, et regrettent que le passage de chargé à directeur se fasse plus sur des critères comptables (nombre de publications) plutôt que sur un véritable changement du niveau de responsabilité des candidats. Au passage, certains souhaitent une meilleure définition du rôle des personnels, pour éviter que l'indépendance des chercheurs n'entraîne

une balkanisation des équipes; d'autres constatent la quasi-impossibilité de recruter des chercheurs de haut niveau formés dans l'industrie.

Les rapports en relation avec les Sciences de la Vie sont unanimes à poser le problème de la publication scientifique constatant la position hégémonique des périodiques anglo-saxons et en conséquence du système d'évaluation dont ils représentent la référence mondiale. Et, pour mieux souligner les défauts des critères "bibliométriques" qui sont basés seulement sur le nombre des publications et ne tiennent pas compte de leur qualité, ils épinglent le rôle de plus en plus hégémonique de l'*Instituts for Scientific Information* et des *Current Contents*.

Pour limiter la prédominance des revues américaines, certains proposent que les organismes de recherche européens garantissent Financièrement le lancement de revues concurrentes européennes.

Enfin, l'inflation du nombre des publications pose le problème de l'accès direct aux revues et aux livres, surtout dans les centres qui ne peuvent supporter le poids financier des abonnements à toutes les revues.

Une autre préoccupation commune à plusieurs rapports est liée à la maîtrise des moyens informatiques (dont la demande est très forte), ainsi qu'aux réseaux et aux problèmes de maintenance qui exigent la présence d'ingénieurs et de techniciens.

Enfin, toutes les autres recommandations concernent les structures de la recherche. Reconnaisant le rôle des groupements de recherches et des programmes interdisciplinaires dans le développement de l'interdisciplinarité, ainsi que les multiples possibilités de rencontres et de séminaires, certains préconisent leur extension au niveau européen, par exemple par le biais de réseaux. Le développement des relations européennes est fortement souhaité dans un souci de complémentarité des compétences, bien que les programmes financés par la Communauté européenne puissent rendre délicat le contrôle de la politique nationale de recherche. Dans un même souci d'équilibre compatible avec la mission de recherche fondamentale du CNRS, le problème de la part du financement des laboratoires par l'industrie a été posé.

Finalement, comment transformer la connaissance en produits technologiques demeure une question, même si certains préconisent la formation de pôles de compétence.

## LES CHOIX STRATÉGIQUES

La rédaction d'un document comme le présent *Rapport de conjoncture* n'est possible qu'au sein d'un organisme comme le CNRS où toutes les disciplines scientifiques sont représentées. Il apporte un panorama irremplaçable d'une très grande partie de l'activité de recherche fondamentale en France, de ses principales tendances. Bien sûr, parmi toutes les voies indiquées, il faudra choisir celles qui seront poursuivies, et ces choix relèvent pour une large part d'autres instances que le Comité national. Les moyens matériels et humains étant limités, il va de soi que toutes les propositions présentées dans ce rapport ne pourront être mises en œuvre. Certains de ses rédacteurs pourront en concevoir un peu d'amertume. Ce serait dommage! Même non prise directement en compte, toute idée originale chemine de façon plus ou moins souterraine et porte ses fruits, d'une façon ou d'une autre. Nombreux sont les responsables - au sein du CNRS, des autres organismes, des instances administratives et politiques, des entreprises, en France comme à l'étranger - qui trouvent dans un tel rapport des éléments, une inspiration pour leur action.

Surtout, bien sûr, il sert de terreau, de mine d'idées au schéma stratégique dans lequel la direction du CNRS indique les orientations principales de son action dans les années à venir. Ce schéma verra le jour dans les prochains mois.

Pour un chercheur, participer à la rédaction du *Rapport de conjoncture* est l'occasion de sortir de ses préoccupations immédiates et d'adopter une certaine hauteur de vue. C'est sans doute, au sens le plus fort du terme, un travail de recherche dont il est légitime de tirer une certaine fierté,

**Le Comité de lecture**

# 01

## LES MATHÉMATIQUES ET LEURS INTERACTIONS

Les mathématiques sont tout à la fois une science poursuivant pour elle-même ses propres développements, et un outil universel pour toutes les autres sciences. L'équilibre entre ces deux axes est complexe, et la façon que l'on peut avoir de l'appréhender conditionne à l'évidence l'orientation d'une politique scientifique en mathématiques.

Le rapport entre le "noyau dur" et les applications a fortement évolué depuis quelques décennies. Divers facteurs, tant sociaux que scientifiques, ont depuis poussé les mathématiques à s'ouvrir davantage sur le monde qui les entoure, que ce soit le monde universitaire des autres disciplines ou le monde industriel.

Aujourd'hui, sans que l'importance des applications des mathématiques soit le moins du monde minimisée, un certain besoin de recentrage est perçu par la communauté mathématique, dont l'ampleur peut être mesurée par la nuance entre le titre du chapitre la concernant dans le *Rapport de conjoncture* 1989 : "*Interactions des mathématiques*" et celui d'aujourd'hui "*les mathématiques et leurs interactions*".

### LES ENJEUX

Les résultats mathématiques se caractérisent essentiellement par leur généralité et par leur permanence. Ces deux caractéristiques, que nous allons développer, sont à l'origine des spécificités des relations entre les mathématiques, les autres sciences et les applications.

On reproche souvent aux mathématiques une constante de temps considérable : la résolution d'un problème peut survenir plusieurs années - voire plusieurs décennies - après qu'il ait été posé, et ne plus intéresser l'auteur. Sans parler des exemples fameux où la solution s'est fait attendre plusieurs siècles ou millénaires : quadrature du cercle, trisection de l'angle, nombres parfaits, théorème de Fermat, hypothèse de Riemann... Bien que ce soit souvent un stimulant très puissant pour les mathématiciens, cet état de fait est un handicap certain pour les interactions des mathématiques. C'est aussi une manifestation de la durabilité des concepts mathématiques, qui en fait un enjeu culturel de première grandeur. La spécificité de ces concepts n'est pas l'abstraction, mais la généralité. Leur valeur est donc interdisciplinaire par essence : qu'ils proviennent d'une discipline, et l'on découvrira, grâce à l'approche mathématique, que la



même structure gouverne un phénomène dans un tout autre domaine. C'est une des fonctions des mathématiques que d'établir des relations entre des notions abstraites et de permettre d'identifier des modèles ayant la même structure.

A cette généralité s'ajoute donc la permanence de la validité des résultats et des théories mathématiques ; on ne peut comparer, de ce point de vue, la "crise des fondements" qui a affecté les mathématiques dans la période 1890-1935 et les révolutions qui ont touché la physique à peu près à la même époque. Une théorie physique n'est valable que dans certaines limites : de distance, de vitesse, de temps ou de masse par exemple (on s'en aperçoit le plus souvent après coup, au moment de l'établissement d'une nouvelle théorie). Par contraste, un théorème sera toujours vrai et certains seront toujours utiles.

Ces deux propriétés de permanence et de généralité permettent, à la longue, l'assimilation des idées utiles par le plus grand nombre d'individus. Les mathématiques font donc pleinement partie du patrimoine culturel de l'Humanité. Il n'est pas besoin de dire à quel point cette diffusion des connaissances mathématiques est utile au progrès de toutes les sciences.

Les mathématiques participent donc simultanément :

- *au développement de la culture humaine*, et les mathématiciens tiennent à être reconnus comme détenteurs d'une part de cette culture,

- *au mouvement général des sciences* : leur langage sert à la fois de support à bien des développements, que ce soit en physique, en biologie ou en sciences de l'homme, et de moyen de communication entre ces sciences,

- *au développement du monde moderne* : les mathématiques élaborées ont un impact technologique croissant et contribuent à l'augmentation de la production dans tous les domaines, à celui de la circulation d'information et des capacités d'organisation.

Au-delà de cette évolution qualitative, on peut schématiquement dire que le lien entre mathématiques et interactions a essentiellement été marqué depuis quatre ans par deux phénomènes :

D'une part, l'accroissement phénoménal des puissances de calcul des ordinateurs s'est poursuivi, au point qu'aujourd'hui des entreprises de taille moyenne peuvent avoir facilement accès à la simulation numérique dans des conditions réalistes. Ceci accroît considérablement les enjeux industriels des mathématiques, comme d'ailleurs leurs enjeux dans des domaines aux ambitions avant tout cognitives (biologie ou sciences sociales par exemple). Le rôle du CNRS sur ce point est - et doit demeurer - important : beaucoup d'industries utilisent en effet les compétences des laboratoires du CNRS pour résoudre leurs problèmes de modélisation numérique.

D'autre part, les interactions des mathématiques avec les autres sciences sont marquées par l'utilisation de plus en plus répandue de modèles (voir le thème "*Modélisation*" du *Rapport de conjoncture*). La plupart de ces modèles s'expriment dans le langage mathématique, et leur traitement fait usage de résultats mathématiques parfois très sophistiqués ou suscitent des recherches dont certaines sont de nature fondamentale. Soulignons l'importance souvent ignorée de ce que l'on pourrait appeler la "modélisation fondamentale", dans laquelle une théorie abstraite en soi bénéficie de l'apport du mathématicien. Un exemple typique réside dans l'essor en physique théorique de l'usage de la géométrie non commutative.

Les enjeux économiques et sociaux du développement de modèles mathématiques efficaces ne cessent de croître : la régulation et le pilotage des grands réseaux techniques (réseaux nationaux et internationaux de télécommunication, d'énergie, de transports...), la gestion de systèmes socio-économiques (les entreprises, les grandes administrations) d'une complexité croissante, la maîtrise des interactions entre nos sociétés et le milieu naturel (les problèmes d'environnement), le besoin d'une connaissance plus fine des phénomènes naturels

eux-mêmes (qui se traduit, par exemple, par la nécessité de disposer de prévisions météorologiques de plus en plus précises et fiables) sont autant de champs d'application en plein développement et d'interactions pour les mathématiques.

On verra que les mathématiques ont une part cruciale dans beaucoup de développements technologiques récents. On évoquera également le rôle qu'elles jouent dans la formulation et la modélisation des sciences, notamment (mais pas uniquement) de la physique. On a aussi mentionné l'utilité des concepts et de la démarche mathématique. Pour conclure, il nous semble important de rappeler que les mathématiques sont aussi une science de la nature, et de souligner leur aspect esthétique : après tout, la recherche de la vérité et de la beauté sont des buts tout à fait valables en soi.

## L'ÉVOLUTION ET LES TENDANCES

Depuis environ une vingtaine d'années, il y a eu chez les mathématiciens un changement assez net d'orientation que Ton peut baptiser de "retour au concret". Ceci par contraste et quelque peu en réaction contre la période précédente, qui a commencé juste après l'après-guerre, et qui a été en grande partie dominée par la construction et l'utilisation de "grosses machines" théoriques, l'exemple le plus spectaculaire étant celui de la géométrie algébrique.

Cette tendance, symbolisée pour le meilleur et pour le pire par le groupe Bourbaki, était spécialement marquée en France; il faut d'ailleurs noter qu'elle a coïncidé avec une place particulièrement brillante de notre pays dans la recherche mathématique mondiale. Bien que les dangers de stérilisation aient été fort exagérés, il n'en est pas moins vrai que les contacts avec les autres disciplines scientifiques étaient devenus plus difficiles.

## 1 - INTÉGRATION DES MATHÉMATIQUES

La recherche mathématique est aujourd'hui tellement foisonnante qu'il serait fort présomptueux de prétendre donner un panorama des progrès réalisés récemment. Nous allons nous contenter de décrire quelques domaines qui paraissent les plus caractéristiques de son évolution.

Une caractéristique de la période actuelle semble être l'intégration toujours plus grande des mathématiques, au sens où il est de plus en plus fréquent qu'un concept né dans un domaine soit appliqué avec fruit dans un autre parfois très éloigné. Cela est aussi vrai, et c'est en grande partie nouveau, de concepts nés en dehors des mathématiques, notamment en physique, informatique et biologie. Ce transfert de concepts produit parfois des résultats inattendus et spectaculaires. Parmi les exemples les plus marquants, citons

- l'utilisation des théories de jauge, issues de la physique des particules, dans la topologie des variétés de dimension quatre,

- l'application des algèbres d'opérateurs à la théorie des nœuds,

- les rapports mystérieux entre le chaos quantique et l'hypothèse de Riemann,

- la multiplicité des techniques qui interviennent dans les mathématiques de la vision : ondelettes, physique statistique, réseaux de neurones, géométrie algébrique,

- les théories de la complexité,

- enfin, l'exemple sans doute le plus fascinant est relatif à l'utilisation de concepts de théorie quantique des champs dans divers domaines topologiques et géométriques, ainsi qu'en analyse sur les variétés : théorie de Morse, topologie algébrique (cohomologie elliptique), théorie de l'indice, variétés de petite dimension...

Tâchons néanmoins de dégager les principales problématiques actuelles - ou pour le moins un échantillon de celles-ci - et de cerner les thèmes en émergence, tout en soulignant, autant que faire se peut, les interactions, soit internes à la discipline, soit surtout avec les disciplines voisines,

## 2 - INTERACTIONS ENTRE LA PHYSIQUE ET LA TOPOLOGIE

On rencontre d'abord ces interactions dans l'étude topologique des variétés de petite dimension. Cette étude est cruciale, en particulier par ses évidentes relations avec la physique où Ton ne cesse de traiter de variétés de dimension deux (surfaces), trois (localement analogues à notre espace), ou plus généralement  $n$ , pour  $n$  petit.

Les problèmes de classification des variétés étant essentiellement résolus depuis vingt ans en dimension supérieure à cinq, l'attention s'est portée sur les dimensions trois et quatre : il est peut-être assez remarquable que ces dimensions, qui sont celles de l'espace et de l'espace-temps "ordinaire", soient de loin les plus riches. Il y a cependant, pour le mathématicien, une différence notable : en dimension trois, on dispose d'une description conjecturale assez complète qui constitue une vaste généralisation de la conjecture de Poincaré, et dans laquelle la géométrie hyperbolique joue un rôle crucial. En revanche, en dimension quatre, notre compréhension a été complètement bouleversée dans les dix dernières années, avec notamment la découverte d'une différence radicale entre variétés topologiques et différentielles, phénomène spécifique à cette dimension,

Il y a eu d'abord la preuve de la conjecture de Poincaré topologique en dimension quatre, véritable tour de force qui a rajeuni de façon inattendue une vieille école de topologie générale. Plus généralement, une classification complète des variétés topologiques de dimension quatre à groupe fondamental pas trop compliqué a été obtenue.

Mais le véritable début de la période actuelle est constitué par l'utilisation des théories de jauge des solutions des équations de Yang-Mills, issues de la physique des particules des années 50, pour étudier les variétés différentielles de dimension quatre. Le résultat le plus stupéfiant, obtenu en combinant ces travaux avec les résultats sur les variétés topologiques, fut l'existence d'une structure différentielle exotique sur l'espace euclidien ; c'est la seule dimension où une telle structure existe. Par la suite, on a même montré qu'il y a une infinité continue de telles structures exotiques, ce qui semble apparenter les variétés de dimension quatre plus aux variétés complexes (par exemple les surfaces de Riemann) qu'aux variétés réelles des autres dimensions. Un fait très curieux est que la théorie utilisée pour démontrer ces résultats a pour origine certaines équations de la relativité, mais dans lesquelles on considérerait le temps comme imaginaire pur, passant de l'espace de Minkowski à l'espace euclidien. Tout récemment cette théorie a été utilisée pour étudier les plongements lisses de surfaces réelles dans les surfaces complexes. La version locale de ces résultats permet de répondre à de vieilles questions de théorie des nœuds.

Un développement ultérieur combine cette théorie avec l'interprétation supersymétrique de la théorie de Morse pour définir une homologie d'instants pour les sphères d'homologie entière de dimension trois. Celle-ci raffine un précédent invariant qui s'était montré pertinent pour l'étude de la conjecture de Poincaré en dimension trois. Ce dernier illustre le fait que les méthodes "classiques" ont encore beaucoup à donner à condition d'être utilisées de manière inventive. C'est aussi ce que montre la preuve récente du fait qu'un nœud classique est déterminé par son complément complémentaire dans l'espace ambiant,

Un développement spectaculaire fut l'application de la théorie des algèbres d'opérateurs à la théorie des nœuds, domaines *a priori bien* éloignés : invariants polynomiaux pour les nœuds et les entrelacs. Maintenant on comprend mieux ce qu'une telle relation a de naturel, comme Test la relation entre les représentations du groupe de tresses et l'origine de l'équation de la R-matrice.



Mais l'événement de ces cinq dernières années a - paradoxalement peut-être - davantage consisté en une influence de la physique théorique sur les mathématiques fondamentales, par la spectaculaire intervention de la théorie quantique des champs en topologie et géométrie, et notamment pour les variétés de dimension trois et quatre (annonce d'une théorie quantique topologique des champs, nouveaux invariants).

Elle a donné naissance à toute une industrie de travaux à la frontière de la physique théorique, de la topologie de petites dimensions, de l'analyse non linéaire, des représentations de groupes, des algèbres d'opérateurs, des groupes quantiques... L'histoire avait commencé il y a une dizaine d'années, avec l'introduction en topologie et géométrie différentielle de méthodes de la théorie quantique des champs (supersymétrie). Ces idées ont même été utilisées dans des domaines assez éloignés, comme la transformation de Fourier géométrique ou l'analyse complexe.

De façon plus globale, les liens entre les mathématiques - et en particulier la géométrie - et la physique sont innombrables, de la théorie conforme des champs aux intégrales de Feynman en passant par la quantification géométrique ou la théorie quantique générale des champs. Les motivations des physiciens ont poussé à de remarquables innovations concernant les groupes quantiques et les algèbres d'opérateurs, la méthode de *scattering* inverse se révélant par exemple, une motivation pressante pour la construction et l'étude des systèmes intégrables quantiques.

De même, dans le domaine extrêmement vaste de la mécanique statistique, les problèmes de transitions de phase, par exemple, ont tout à la fois bénéficié de l'étude des algèbres de Lie et motivé celles-ci, tandis que le développement en physique théorique de la théorie des cordes a suscité toute une problématique en topologie algébrique (analyse des genres elliptiques).

On pourrait multiplier à l'infini les exemples de ce développement parallèle de la physique théo-

rique ou de la physique mathématique et de théories mathématiques relevant de diverses branches : fonctions thêta non commutatives et équations de solitons (équations KP), thermodynamique des nombres (caractérisation en termes d'algèbres d'opérateurs de la "transition d'Hagedorn"), modèles conformes et algèbre de Virasoro, systèmes intégrables et géométrie algébrique.

L'étude de phénomènes chaotiques, de la turbulence (au sein d'un gaz, par exemple, avec des applications directes en météorologie) fait aujourd'hui intervenir directement la décomposition en ondelettes, domaine auquel l'école française a apporté une contribution décisive. Les probabilités elles-mêmes interviennent sans cesse davantage en physique, par exemple au travers des spectres d'hamiltoniens aléatoires ou des probabilités quantiques.

### 3 - EQUATIONS AUX DÉRIVÉES PARTIELLES ET MODÉLISATION

L'étude des équations aux dérivées partielles, qui relève en l'occurrence de l'analyse non linéaire, a, de tous temps, été fondamentale pour un très grand nombre de problèmes "appliqués". Notons, à titre de curiosité, que Tune des méthodes les plus employées, tant par les mathématiciens que par les utilisateurs, la méthode des éléments finis a été créée par des non-mathématiciens, et que la théorie a souvent bénéficié de ses applications, un exemple étant donné par le principe de taxation présent en économie en théorie des incitations, qui a fourni la solution d'une équation aux dérivées partielles qu'on ne savait pas résoudre.

Mais, alors que pour les équations de Yang-Mills vues dans le paragraphe précédent l'intérêt de l'équation résidait en grande partie dans le modèle physique qu'elle portait, l'accent ici est différent, et l'on s'intéresse plus aux solutions des équations pour elles-mêmes. C'est le cas pour les équations aux dérivées partielles elliptiques non linéaires, par exemple dans le problème de Yamabe, et Ton a vu



la preuve de diverses conjectures : conjecture de Calabi, conjecture de la masse positive en relativité générale. On a aussi constaté des phénomènes étonnants, comme l'apparition de "bulles" dans les équations aux dérivées partielles elliptiques ayant une non-linéarité critique, avec un retour aux équations de Yang-Mills, dans le cas des courbes holomorphes

Les applications en physique sont souvent relativement directes : découverte d'un type nouveau de solutions pour la turbulence en mécanique des fluides, la question demeurant posée du lien avec les solutions de viscosité, méthode de compacité par concentration. Les retombées, en biologie par exemple, de l'étude de la variété inertielle ou de la dimension fractale des attracteurs, en particulier pour les équations d'évolution décrivant des systèmes dynamiques de dimension infinie, sont encore aujourd'hui loin d'être claires.

Pareillement, toute une branche d'analyse extrêmement fine se fait sur un arrière-plan d'interaction directe en physique : l'analyse microlocale, qui étudie entre autres la propagation des singularités des solutions des équations aux dérivées partielles (en particulier hyperboliques). Et l'on peut prévoir un important développement de méthodes, considérant les propriétés qualitatives de ces équations et de leurs solutions, y compris de méthodes topologiques.

Toute une classe *des* équations aux dérivées partielles peut être qualifiée d'équations géométriques ; l'étude des surfaces minimales plongées dans l'espace euclidien de dimension trois, par exemple, est l'un des plus anciens problèmes de la géométrie différentielle; il a fait l'objet de nombreux travaux mathématiques suscités notamment par les problèmes posés par les physiciens (problème de Plateau sur l'existence d'un film de savon à contour donné, par exemple). Ces dernières années, son intérêt s'est affirmé dans des domaines extrêmement variés de la physique, de la chimie et de la biologie.

l'intérêt pour les surfaces minimales (ou à courbure moyenne constante) périodiques. Deux de ces surfaces avaient été étudiées déjà à la fin du siècle dernier par Schwarz, mais ces observations nouvelles ont entraîné un renouveau d'études mathématiques aboutissant, entre autres, à la découverte de la surface minimale périodique cubique la plus fréquemment observée expérimentalement.

Des travaux sur ordinateur ont permis de visualiser un grand nombre de ces surfaces minimales ou à courbure moyenne constante dont on ne possède pas de représentation analytique. Les comparaisons de ces images avec celles obtenues, par exemple, en microscopie électronique sont assez frappantes. Les discussions interdisciplinaires ont permis d'enrichir les interprétations des expériences, les modélisations des systèmes, et de poser ou de relancer des problèmes mathématiques intéressants.

De plus, ceci a aidé à trouver de nouvelles surfaces minimales plongées, et a contribué à renouveler ce domaine. Par ailleurs, les surfaces minimales dans des variétés de dimension trois autres que l'espace euclidien ont joué un rôle important en topologie de petite dimension. Tout ce domaine est aujourd'hui fort actif.

Il en est de même des développements des équations aux dérivées partielles stochastiques. L'école française s'est montrée dans les tous premiers rangs mondiaux pour l'étude des équations différentielles stochastiques (en particulier des diffusions), s'appuyant pour cela sur une excellente école probabiliste : elle se doit donc d'occuper une place mondiale dans le domaine *des* équations aux dérivées partielles stochastiques, à la frontière entre les courants stochastiques et l'analyse numérique ou le calcul scientifique. Le rôle des retombées - et donc des modélisateurs - sera de toute première importance, que ce soit en physique, en biologie (dynamique de population, modélisation d'influx nerveux...), ou encore dans le domaine des mathématiques financières.

jouera un rôle croissant dans le domaine des équations aux dérivées partielles, soit pour des résolutions numériques, soit même, dans le cadre stochastique, pour des simulations numériques.

## Interactions avec les mathématiques appliquées

Les phénomènes physiques quantitatifs sont généralement décrits par des solutions d'équations aux dérivées partielles non linéaires dans des limites singulières variées. Par exemple, dans l'équation de Navier-Stokes en mécanique des fluides, on fait tendre la viscosité (mesurée par l'inverse du nombre de Reynolds) vers zéro. A la limite, on obtient l'équation d'Euler. Si la viscosité est très petite mais non nulle, on a les phénomènes de turbulence. Le développement récent des moyens de calcul et de la sophistication des algorithmes a permis de découvrir par simulation numérique des phénomènes inattendus qu'on ne peut pas toujours reproduire expérimentalement. Mathématiquement, le comportement limite d'une suite de solutions fait intervenir le phénomène de concentration de l'énergie et d'oscillations décrites par une mesure de Young, grâce à laquelle on peut calculer toutes les limites faibles de fonctions non linéaires de la suite de gradients.

Tout récemment, cette théorie mathématique a été utilisée pour expliquer certaines transitions de phase dans les solides (alliages notamment) en fonction de la température. De tels phénomènes sont modélisés mathématiquement dans le cadre de l'élasticité non linéaire, gouvernée par une énergie non convexe. De nombreuses recherches mathématiques s'efforcent actuellement de comprendre la nature des supports possibles des mesures de Young pour analyser l'orientation des phases et les phénomènes de maillage martensitiques.

La compréhension de ces phénomènes est un modèle pour une interaction interdisciplinaire mettant en jeu des idées d'analyse non linéaire, de calcul numérique, et des méthodes asymptotiques sophistiquées.

Dans la théorie des cristaux liquides, si Ton veut prescrire les défauts, on est amené à considérer un certain type d'applications harmoniques. Là encore, l'énergie n'atteint pas son infimum, et il y a concentration dans les gradients de déformation.

## Mécanique des solides : localisation des déformations

Le phénomène de "localisation des déformations" est couramment observé avant la rupture d'une pièce sollicitée mécaniquement. Sur le plan mathématique, cette localisation correspond à la perte d'ellipticité (faible) de l'opérateur tangent gouvernant l'évolution du champ de déformation (ou à la perte de la convexité de rang un de l'énergie minimisée par ce champ). Cet opérateur comprenant une partie locale et des conditions aux limites, l'examen de son ellipticité permet tout aussi bien de prévoir l'apparition des bandes de localisation au cœur du matériau que leur naissance au bord de la pièce.

Cette transition d'un régime elliptique à un régime hyperbolique des équations aux dérivées partielles qui gouverne le phénomène est connue de longue date dans l'analyse des chocs en mécanique des fluides. Mais il a fallu attendre la fin des années 70 pour en percevoir la portée en mécanique des solides, en raison de la diversité et de la complexité plus grande des lois de comportement des matériaux. Tout récemment, ces travaux ont été formalisés, puis généralisés au cours des trois dernières années, notamment en France, et l'on est maintenant en mesure de prévoir l'apparition et l'orientation de ces bandes de localisation pour une gamme très large de matériaux.

Ces travaux ont des prolongements numériques importants, et ils sont également appelés à jouer un rôle important dans une nouvelle formulation des lois de comportement.

## 4 - NOUVELLES INTERACTIONS ENTRE LA GÉOMÉTRIE ET L'ALGÈBRE

Un trait frappant de l'évolution mathématique récente est le retour de la géométrie sous toutes ses formes, (La période précédente était bien dominée par la géométrie algébrique, mais la nature des méthodes était plus algébrique que géométrique). Un des aspects les plus intéressants est l'application d'idées géométriques à des problèmes algébriques, l'exemple le plus notable étant la théorie géométrique des groupes discrets.

Les travaux récents sur la géométrie non commutative proposent une nouvelle vision de l'espace physique fondée sur la théorie des algèbres d'opérateurs. Les développements possibles sont extraordinaires.

### **Théorie géométrique des groupes discrets**

La *théorie combinatoire des groupes* étudie les groupes infinis de type fini, c'est-à-dire engendrés par un nombre fini d'éléments. Ces groupes apparaissent de manière très naturelle en topologie, H. Poincaré a en effet montré qu'il est possible d'associer à un espace topologique un *groupe fondamental* qui est de type fini dans la plupart des cas intéressants. La compréhension de ce groupe fondamental donne souvent une information très précise sur l'espace étudié. Pour cette raison, la théorie combinatoire des groupes a eu un développement important en essayant, comme son nom l'indique, de dégager des invariants combinatoires, si possible calculables explicitement. Le groupe est le plus souvent donné par une présentation dont on oublie l'origine topologique. Un exemple important de cette méthode est la théorie de la *petite simplification*, dégagée dans les années 60, qui consiste à étudier des groupes ayant très peu de relations entre leurs générations.

Un renouveau est apparu récemment dans cette théorie, justifiant probablement un change-

ment de terminologie; on parle plutôt aujourd'hui de "théorie géométrique des groupes discrets"<sup>11</sup>. L'idée principale est que le groupe fondamental d'un espace reflète non seulement les propriétés topologiques, mais aussi la géométrie de l'espace étudié. Ainsi, le groupe fondamental d'une variété à courbure négative a des propriétés extrêmement précises. Un travail important de fondement a été fait récemment : la définition et l'étude d'une classe de groupes appelés "hyperboliques" qui ont des propriétés proches des groupes fondamentaux des variétés à courbure négative. Il s'agit d'un changement de point de vue, car ces groupes ne sont pas définis en termes algébriques ou combinatoires, mais en termes de la géométrie de la métrique des mots. Cette nouvelle approche permet en particulier d'éclairer la "vieille" théorie de la petite simplification qui rentre maintenant très naturellement à l'intérieur de la théorie "hyperbolique"<sup>11</sup>.

Cette théorie géométrique des groupes discrets est en très forte interaction avec de nombreux domaines : topologie des petites dimensions, géométrie différentielle, systèmes dynamiques, théorie ergodique, et aussi informatique. Par exemple, la théorie des groupes automatiques se propose de décrire une famille de groupes (dont les groupes hyperboliques) qui peuvent être effectivement étudiés sur des ordinateurs. L'espoir est de disposer rapidement de programmes efficaces qui permettent de classer certaines variétés de dimension trois (pas trop compliquées).

Un nouveau point de vue sur ces questions engendre, bien sûr, de nouveaux problèmes, et la recherche est actuellement très active sur ces questions. Grâce à la qualité de sa recherche en géométrie et topologie, la France joue maintenant un rôle important dans le développement actuel de cette théorie.

Des interactions nouvelles entre la géométrie algébrique et la combinatoire semblent très prometteuses : elles concernent en particulier le lien entre la géométrie des polyèdres et la géométrie algébrique, y compris pour la construction de variétés algébriques réelles ainsi que la résolution de



célèbres conjectures sur les nombres de faces de diverses dimensions des polytopes, ou les liens entre la théorie des singularités, en particulier la géométrie des discriminants, et la combinatoire.

L'école française de systèmes dynamiques est sans conteste une des toutes premières, sinon la première du monde. C'est sans doute un juste retour des choses pour une discipline créée par H. Poincaré, et qui a connu ces dernières années un succès médiatique certain pour les aspects chaotiques et fractals.

## 5 - ALGÈBRE, GÉOMÉTRIE ALGÈBRIQUE ET THÉORIE DES NOMBRES

Ici encore, les progrès réalisés en mathématiques depuis quelques années sont spectaculaires ; citons la classification des variétés algébriques complexes de dimension trois modulo équivalence birationnelle et la structure des morphismes birationnels, ou les progrès décisifs vers l'établissement du programme de Langlands (correspondance entre les représentations 1-adiques et formes automorphes),

De fort vieux problèmes ont significativement évolué, par exemple avec les récents résultats sur les points rationnels des variétés algébriques, et en particulier le théorème de Fermat (conjecture ABC); par ailleurs, ce dernier semble maintenant "motivé" par les connexions avec les formes modulaires. Notons ici aussi l'utilisation accrue de calculs sur ordinateur.

De gros progrès ont été faits dans la compréhension du défaut de passage du local au global dans certaines équations diophantiennes (principe de Hasse-Minkowski et conjecture de Tate-Chafarevitch).

Enfin, le gigantesque programme de classification des groupes finis simples, engagé depuis les années 60, a été mené à son terme (*des* centaines de participants dans une dizaine de pays, peut-être dix mille pages de démonstration !), Signalons aussi

que des connexions fascinantes sont apparues entre certains des groupes sporadiques (notamment le fameux Monstre) et la physique théorique.

## 6 - LES INTERACTIONS ENTRE INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUE

Ces interactions sont loin de se borner, comme on le croit trop souvent, à l'utilisation de plus en plus fréquente des moyens de calculs par les mathématiciens pour la modélisation. L'ordinateur est souvent utilisé comme un outil expérimental par les mathématiciens qui testent, grâce à lui, des conjectures par le calcul ou la visualisation. De nouvelles surfaces minimales ont ainsi été décrites et visualisées grâce à l'informatique. Certains théorèmes, comme la fameuse conjecture des quatre couleurs, n'ont pu être prouvés que grâce à une vérification sur ordinateur, et aucune démonstration purement humaine n'est encore disponible. En topologie algébrique également, des calculs effectifs commencent à donner des résultats nouveaux (notamment pour les calculs des espaces de lacets).

Mais ceci n'est peut-être pas l'essentiel. Des pans entiers des mathématiques comme l'algèbre, la géométrie algébrique ou la logique voient leurs problématiques modifiées par l'informatique. Les questions d'effectivité, de complexité et d'efficacité sont à l'ordre du jour. Une première question est, en effet, le caractère constructif des méthodes employées pour obtenir un résultat : c'est la question d'effectivité. Dans les bons cas, on peut étudier des algorithmes et donner une estimation de leur temps de calcul en fonction de paramètres bien choisis : c'est la question de la complexité. Enfin le développement de techniques efficaces permet dans certains cas de mener à bien les calculs.

C'est souvent par l'intervention de théories mathématiques plus élaborées que des algorithmes de complexité optimale peuvent être construits : citons par exemple le problème du déménageur de piano, un des problèmes fondamentaux de la robotique théorique, pour lequel des algorithmes de



complexité simplement exponentielle dans le nombre de variables viennent d'être mis au point, basés sur des idées de théorie de Morse et de géométrie différentielle. Les résultats anciennement connus et basés sur la théorie de l'élimination donnaient une complexité doublement exponentielle. L'obtention de bornes inférieures pour les algorithmes résolvant un problème donné est très difficile. Les quelques techniques disponibles d'obtention de bornes inférieures reposent souvent sur des idées algébriques ou géométriques et utilisent des théorèmes mathématiques profonds.

La logique revient à ses origines syntaxiques et à son programme ambitieux de fondement général du calcul. La théorie de la démonstration, éclipsée un temps par la théorie des modèles ou la théorie des ensembles, fait un retour en force.

Le calcul formel, qui consiste à développer des logiciels de manipulation symbolique et à étudier la complexité des algorithmes dans ce domaine, émerge comme une nouvelle composante du calcul scientifique.

Enfin les structures et concepts liés au développement de l'informatique, tels les automates ou les graphes, par exemple, donnent naissance à de nouvelles théories mathématiques.

La théorie des classes de complexité, qui cherche à classer les problèmes de nature algorithmique par niveau de difficulté intrinsèque, connaît un développement rapide. Le problème "P est-il égal à NP ?" est un des plus célèbres de cette nature. Les problèmes les plus difficiles de la classe NP sont les problèmes pour lesquels la vérification qu'une solution est la bonne est très rapide, alors que l'obtention d'une solution est très longue. De tels phénomènes se rencontrent dans la pratique quotidienne du mathématicien : il est aisé de vérifier qu'un certain nombre est bien le produit de deux autres, alors que le problème de la factorisation des entiers est très difficile (mais on ne sait pas démontrer que le problème de la factorisation des entiers est un des problèmes difficiles de la classe NP).

Les progrès de l'informatique d'aujourd'hui rejoignent ainsi de grands problèmes fondateurs des mathématiques.

## 7 - LES SCIENCES COGNITIVES

Pour le mathématicien, de 1992, le thème "sciences de la cognition" évoque à la fois une "nouvelle frontière" des mathématiques et une composante de celles-ci qui existe au moins depuis les mathématiciens présocratiques,

On peut dire, en effet, qu'une partie des mathématiques abstraites participe à la création d'un langage qui rend compte de phénomènes liés au mode biologique de perception de l'environnement dont nous disposons. Cela était probablement encore évident pour les mathématiciens et les philosophes jusqu'à ce que Petitot appelle joliment le "Yalta transcendantal" post-Kantien, qui a séparé les domaines de réflexion des sciences dites "dures" des autres, dont la Philosophie. Certaines pages de Locke ou Berkeley, sans parler de Maimonides ou Descartes, voire Helmholtz, sont d'une actualité frappante pour les sciences de la cognition, tant en ce qui concerne leur aspect biologique ou physique que leur aspect logique ou mathématique. Cependant, le "Yalta transcendantal" a fait de tels dégâts que ce qui paraissait une évidence à un penseur de la Philosophie Naturelle (au sens de *"Natural Philosophy"*) se trouve aujourd'hui couvert d'éloges... pour son interdisciplinarité.

Si le fait de rassembler des disciplines pour étudier la cognition n'est donc nouveau que dans la mesure où nous avons oublié un passé relativement proche, il présente en ce moment un aspect "nouvelle frontière" tout à fait fascinant, dû pour une grande part aux progrès de la logique, de la neurologie, de la psychologie cognitive, des mathématiques, de la physique, de l'informatique et de la philosophie. Parmi les progrès essentiels, il faut citer la réapparition, dans certaines de ces disciplines, d'une attitude modeste devant la difficulté des problèmes : citons des exemples qui sont tous

un peu de la même nature : une meilleure prise des conscience *chez les mathématiciens* des limitations de la méthode axiomatique, *chez les informaticiens* de la difficulté de donner un contenu réel au vocable "intelligence artificielle", *chez les logiciens* de l'impossibilité de réduire le raisonnement à la logique, *chez les linguistes* des limites de l'étude syntaxique. Tous ces phénomènes sont assez caractéristiques de l'évolution des sciences en ce dernier quart, de siècle, et libèrent des myriades de questions importantes. Il faut aussi noter des progrès essentiels dans la compréhension du système neurologique, la découverte d'analogies entre son fonctionnement et des phénomènes de physique statistique, des progrès en informatique théorique et en logique, l'invention de modèles convaincants de la perception visuelle et de la perception auditive, que Ton peut juxtaposer à ce que savent les neurologues et les informaticiens ou les linguistes, et Ton voit que la communication entre les sciences, si difficile pendant tant de temps, connaît une résurgence intense à un niveau technique digne de l'âge d'or évoqué plus haut. De plus, les relations des sciences dites dures avec la philosophie et la psychologie, par exemple, en tirent une nouvelle fraîcheur.

Le chapitre du *Rapport de conjoncture* consacré aux. Sciences de la cognition insiste beaucoup sur l'aspect interdisciplinaire et les enjeux sociaux du sujet. Il nous a paru utile de préciser ici, à titre d'exemple, quelques-uns des aspects d'un intérêt plus direct pour les mathématiciens, à la fois pour montrer que la généralité des concepts mathématiques continue dans ce domaine à jouer son rôle, et pour attirer l'attention des mathématiciens sur des problèmes qui relèvent d'interactions nouvelles très importantes, historiquement liés à la nature même des mathématiques. Les deux exemples choisis sont les rapports de la logique et de l'intelligence artificielle, et la théorie de vision.

La logique mathématique s'est longtemps confinée à des interactions internes aux mathématiques, illustrées par les applications de la théorie des modèles en algèbre. Les interactions externes étaient limitées ou douteuses : ainsi de la théorie de la démonstration "appliquée" à la philosophie des

fondements. Depuis une quinzaine d'années, l'informatique offre un véritable domaine d'application à la logique. Par exemple, sur des questions cruciales comme la sécurité des logiciels, les  $\lambda$ -calculs typés apportent des réponses prometteuses, qui à leur tour induisent de nouveaux développements logiques. Observons que cette liaison fait éclater le cadre de la logique "classique" (celle des mathématiques) en réhabilitant d'autres formalismes, comme la logique intuitionniste de Brouwer.

Ceci ne peut qu'amener à prendre au sérieux le défi logique de l'intelligence artificielle<sup>1</sup>: élargir le cadre déductif au-delà des mathématiques, de façon à embrasser *certaines* des aspects du raisonnement informel.

Comme toujours dans un sujet qui démarre, la priorité est d'ordre méthodologique : quelles sont les bonnes questions ? Trop souvent on assiste au remplacement hâtif de problèmes réels par des problèmes d'école, questions abstraites dont la solution est soit impossible (par exemple, problèmes de cohérence tombant sous le coup du théorème de Gödel), soit sans retombée possible sur le problème de départ, Il nous semble que, dans un premier temps, on devrait se concentrer sur l'axiomatisation de la "rigueur informelle"; autrement dit, se cantonner aux questions pour lesquelles une approche déductive est possible *a priori*, bien que le formalisme adapté fasse défaut. Les systèmes logiques susceptibles de répondre à une telle demande sont de nature très différente de ceux utilisés en mathématique jusqu'à présent, c'est-à-dire essentiellement la logique classique. La mise sur pied de tels systèmes ne peut en aucun cas être le résultat d'un "bricolage"<sup>11</sup> des règles de la logique classique; il est nécessaire d'envisager une refonte totale, intégrant les avancées les plus récentes en logique, et notamment en théorie de Sa démonstration. Tant que cette double contrainte (problèmes traitables et "vrais" outils logiques) ne sera pas satisfaite, le lien, pourtant très prometteur, entre logique et intelligence artificielle, ne pourra pas s'enclencher, et le sujet continuera à piétiner. Il faudrait donc plus de modestie en ce qui concerne les problèmes, et plus d'ambition et de rigueur au niveau des méthodes.

Depuis une quinzaine d'années, la théorie de la vision, c'est-à-dire la compréhension de la manière dont l'appareillage visuel élabore, mesure et reconnaît des images à partir des signaux électriques émis par la rétine, a fait des progrès remarquables. Beaucoup sont dus aux idées de Marr, et plus récemment de Koenderink. Sans entrer dans les détails, signalons certains des outils mathématiques qui interviennent : le développement en ondelettes du signal émis par la rétine permet d'identifier de manière stable les contours par des effets de seuil. La reconstruction d'images à partir des contours fait appel à des résultats liés à l'application de Gauss des surfaces plongées, et le traitement des variations d'échelle de perception (plus ou moins de détails, donc plus ou moins de contours) est modélisé par une opération de lissage gaussien (au sens des spécialistes de l'équation de la chaleur). Arrivé à ce point, le théoricien, qui doit être analyste et géomètre, peut demander à l'expert en réseaux de neurones ou à l'informaticien comment, à son avis, ces calculs peuvent être effectués dans un tel réseau, puis au neurologue s'il discerne des indices compatibles avec les dispositifs requis.

## 8 - LES PROBABILITÉS ET LES STATISTIQUES

Les statistiques sont, à l'évidence, le lieu privilégié de l'interaction entre mathématiques et sciences de la nature : leur objectif est, en effet, en premier lieu de rechercher des modèles qui s'ajustent à la réalité, ensuite de les utiliser pour prédire des comportements, parfois pour utiliser des procédures de contrôle des processus observés, par exemple afin d'optimiser un certain critère.

Aujourd'hui, on les considère comme très proches de la théorie des probabilités, du fait qu'elles utilisent massivement les modèles stochastiques, la modélisation par des aléas de notre connaissance imparfaite de monde s'étant montrée, dans bien des domaines, remarquablement efficace. Mais elles se démarquent des probabilités en ce qu'elles sont de nature inductive ("on remonte des

effets aux causes"), quand la démarche du probabiliste est, comme c'est le cas en général en mathématiques, déductive : elle déduit les conséquences d'hypothèses.

La France s'est montrée très à la traîne en statistiques jusqu'aux années 60 : notre pays payait là son tribut à un mépris alors dominant des applications chez les mathématiciens. Un changement radical - quoique non universel - d'attitude, joint au substrat d'une excellente école de probabilités, a permis, depuis cette période, de considérablement corriger ce défaut, la statistique est aujourd'hui présente dans beaucoup d'universités françaises, et les statisticiens y sont reconnus comme membres à part entière de la communauté mathématique.

La statistique couvre un large spectre allant de son emploi "en routine" aux statistiques théoriques (statistique asymptotique...), voire à la notion qui a émergé depuis le dernier *Rapport de conjoncture* de "probabilités appliquées"<sup>1</sup>, recouvrant une démarche déductive, mais soucieuse des applications concrètes. Un exemple de probabilités appliquées réside dans les systèmes infinis de particules, pour lesquels l'école française figure dans les premiers rangs de la compétition internationale : un problème d'apparence très concret - des particules interagissent dans un espace, entrent en collisions, se détruisent, naissent, etc. - demande, pour être traité, des outils très sophistiqués, fondés sur les martingales en dimension infinie, ou de délicates limites dans des asymptotiques complexes.

Un discours analogue pourrait être développé à propos de la percolation ou des réseaux de neurones, sur lesquels nous reviendrons plus loin. Un autre domaine des probabilités appliquées traite des phénomènes de propagation d'ondes ou de conduction de chaleur dans des milieux aléatoires, ou rejoint l'analyse fine, par exemple dans l'étude d'opérateurs de Schrödinger ou de Dirac aléatoires ou l'étude des flots stochastiques et des équations aux dérivées partielles stochastiques.

L'école française de probabilités étant remarquée par ses résultats concernant les processus, les



filtrations associées, l'étude fine du mouvement brownien, etc., il était prévisible qu'une partie des statisticiens français traitent de statistique des processus, que ce soit au niveau théorique, ou pour leurs applications dans divers domaines, tels l'ingénierie, les mathématiques financières ou l'analyse des durées de survie censurées. On peut partiellement rattacher à ce courant de pensée les statistiques spatiales, pour lesquelles l'indice du processus sous-jacent devient multidimensionnel

Par rapport aux statistiques et à l'analyse numérique, les probabilités ont moins de rapports directs avec les applications, car elles n'interviennent pas dans le traitement des données. Par contre, elles interviennent dans la simulation (choix de procédures, évaluations de leurs performances, ...), dans les modélisations (mise à la disposition du statisticien, par exemple, de schémas mathématiques utilisables), etc

Il est un point assez original en mathématiques appliquées, sur lequel l'attention mérite d'être attirée : les probabilités, de façon continue et diversifiée, ont apporté des idées dans différents domaines des mathématiques pures : théorie des nombres, géométrie (méthodes d'équation de la chaleur), théorie des groupes, systèmes dynamiques et théorie ergodique, théorie des opérateurs (probabilités quantiques), analyse fonctionnelle, physique mathématique (théorie combinatoire des champs, Schrödinger en potentiels aléatoires). Non seulement ce point mérite d'être noté, mais il mérite d'être encouragé, d'autant que les Français sont très présents au niveau international

## 9 - INTERACTIONS MATHÉMATIQUES-BIOLOGIE

Les interactions des mathématiques avec la biologie, au travers ou non de la physique, ont une longue et riche histoire. Les probabilités ont connu un essor important du fait de la génétique (de Mendel à Fisher); les statistiques n'ont cessé de se renforcer au contact de la biologie et de la médecine.

Aujourd'hui la morphogénèse est une source de problèmes pour la géométrie, et Ton ne compte pas les motivations biologiques de la notion de fractal. Depuis l'apparition de la biologie moléculaire et des techniques expérimentales modernes, ces interactions se sont encore diversifiées.

L'interaction entre les mathématiques et les sciences du vivant s'est toujours faite dans les deux sens, et il doit en être ainsi : d'une part les mathématiques sont un outil indispensable au biologiste ou au médecin, et beaucoup reste à faire dans l'élaboration de méthodes mathématiques sophistiquées destinées à traiter les données du vivant : par exemple le traitement de données de suivie censurées, telles qu'on les rencontre en essais cliniques, requiert, pour être mené correctement, une approche fondée sur la théorie des martingales. L'approche du génome humain demande une combinatoire complexe.

Mais aussi, et surtout, le vivant est amené à jouer, pour la recherche mathématique fondamentale, un rôle analogue à celui qu'a joué la physique au XIXème siècle : susciter des problématiques, comme c'est déjà le cas en ce qui concerne les réseaux de neurones ou la mathématisation de la biochimie. Le passage qui se fait depuis 50 ans d'outils mathématiques "réguliers" (analyse classique, fonctions déterministes, dérivabilité, ...) à un outil plus complexe (aléatoire, singularités, fractals, autosimilarité, ...) associé à une puissance de calcul que seuls les ordinateurs modernes permettent, donne au mathématicien la possibilité d'étendre son champ d'application de la physique (au sens large) à la biologie.

Citons quelques exemples de domaines où l'interaction des mathématiques avec la biologie se développe.

La théorie des réseaux de neurones est typique de l'enrichissement mutuel de deux sciences. Elle est partie d'une volonté de modéliser le comportement collectif des cellules du système nerveux central, en attribuant à chacune une capacité de décision très limitée et dépendant de façon simple des



cellules "voisines"; très vite, à côté des algorithmes déterministes (algorithmes cellulaires), s'est fait ressentir la nécessité de processus stochastiques.

Dans un premier temps, donc, on a cherché à comprendre au moyen de tels modèles des comportements humains ou animaux plus ou moins complexes (structuration des organes sensoriels, tels les glomérules "intégrant" le sens olfactif des insectes, ou la vision chez les chais, processus d'apprentissages, etc.), développant par exemple pour cela la théorie des réseaux multicouches.

Mais, dans un second temps, c'est le modèle biologique qui est venu aider au développement de l'outil mathématique et informatique : il est apparu que les réseaux de neurones formels étaient capables de nombreuses tâches mathématiques, au premier rang desquelles la maximisation de fonctions. D'innombrables algorithmes ont été écrits (Hopfield, Kohonen,...) et les applications de tels réseaux, ont aujourd'hui gagné à peu près tous les domaines de l'activité humaine : citons au hasard la recherche de chemins minimaux (problème du voyageur de commerce), la décision économique, le traitement de la parole ou de l'image (telle la reconnaissance des empreintes digitales), etc.

Le traitement mathématique sous-jacent intègre des connaissances issues de multiples branches : probabilités, systèmes dynamiques, physique statistique, algorithmique, etc. Les implications de l'informatique et des mathématiques de l'informatique sont multiples et concernent, par exemple, une parallélisation de plus en plus massive de ces algorithmes, d'autant plus naturelle qu'un réseau de neurones est par construction un système dans lequel de multiples objets évoluent en parallèle.

La reconnaissance artificielle de formes relève un peu de la même dynamique : partie de la modélisation de la vision chez l'être vivant, elle tâche aujourd'hui de réaliser des algorithmes et des machines capables de simuler le comportement de l'animal. C'est un problème passionnant faisant actuellement l'objet de recherches très actives par des

spécialistes de disciplines très diverses. Elle comprend le comptage de particules et le problème de détermination des bords. Du point de vue mathématique, c'est un problème mal posé, dont la solution n'est pas unique. Le rêve est pourtant de réaliser artificiellement ce que fait l'œil humain; pour cela, on utilise des outils très divers : réseaux de neurones, renforcements itérés des coefficients, percolation, ondelettes, géométrie algébrique et informatique (algorithmes de Mumford),

On pourrait multiplier de semblables exemples : l'étude des membranes biologiques et des bicouches lipidiques se fait aujourd'hui par des calculs analytiques à partir des potentiels d'interaction moléculaire ou par des simulations, par exemple de dynamique moléculaire. On applique la théorie des bifurcations des attracteurs des systèmes dynamiques aux systèmes biologiques (transmission d'influx nerveux, phénomènes périodiques, etc.).

La génétique est à elle seule un champ de développement infini pour les mathématiques ; diffusion de gènes dans une population (processus de branchement diffusifs), étude du repliement des molécules biologiques (développement de nouveaux types d'algorithmes). Le séquençage des génomes (en particulier dans le cadre de la cartographie du génome humain) a suscité, ces dernières années, la mise en place de réseaux interdisciplinaires auxquels les mathématiques sont nécessairement associées, et les outils déjà élaborés et à venir mêlent des idées issues de toutes les branches des mathématiques : combinatoire, probabilités, statistiques, algorithmique, topologie, géométrie, etc.

## 10 - D'AUTRES INTERACTIONS

Les domaines d'interaction que nous venons de survoler ne représentent pas - et de loin - les interactions existantes ou potentielles des mathématiques. Il serait totalement vain de prétendre à l'exhaustivité, et de nombreuses champs, parfois essentiels, n'ont pas trouvé place dans ce rapport.

Parmi ceux-ci, citons, à titre d'exemple l'analyse réelle, complexe et harmonique (théorèmes sur les opérateurs d'intégrale singulière), l'invention des ondelettes, la résolution de la conjecture de Bieberbach, les intégrales oscillantes, les représentations des groupes de Lie réductifs, l'optimisation (utilisation de la théorie du contrôle optimal en météorologie - voir le thème "Terre" du *Rapport de conjoncture* - dans le domaine de la catalyse chimique, sélection de l'information sur une métrique non-orthogonale : utilisation des méthodes de Lanczös).

## LA SITUATION

La situation des mathématiques au CNRS se caractérise par la faiblesse de la part du CNRS par rapport à l'Université, comparée au cas des autres sciences "dures" : en gros, un chercheur pour dix enseignants-chercheurs.

### 1 - FORCES ET FAIBLESSES DE LA RECHERCHE MATHÉMATIQUE FRANÇAISE

L'état décrit dans le *Rapport de conjoncture* de 1989 reste essentiellement exact. On peut y ajouter une nette croissance de la demande d'interactions avec les mathématiques, et sa diversification. De plus, les interactions à l'intérieur même des mathématiques se multiplient et se diversifient aussi, ainsi que les interactions "directes" entre le cœur des mathématiques et d'autres domaines (informatique, physique, biologie). Ces interactions ont permis des progrès spectaculaires et en particulier la résolution de conjectures anciennes.

Globalement, les mathématiques se portent bien en France, et notre pays reste un des premiers du monde dans ce domaine, et sans doute le premier en Europe. Cependant il faut être attentif à un certain nombre de faits qui risquent de menacer à moyen terme la place tenue dans le monde par les

mathématiques françaises, et à la correction desquels le CNRS peut apporter une contribution essentielle,

- L'autonomie croissante des Universités et la pression de l'enseignement font que, à part quelques Universités en France, les recrutements tendent à privilégier le renforcement strict des équipes existantes, ce qui nuit à la diversification dont le besoin se fait fortement sentir, et nuit d'ailleurs aussi à la possibilité pour des chercheurs CNRS d'être nommés sur un poste de professeur.

- Un risque de surprivilegier, dans les projets nouveaux, les applications au détriment du cœur; si le cœur est encore très bien défendu, il faut prendre garde que cela n'induisse sur le moyen terme une dérive dangereuse.

Par ailleurs, il y a dans la compétence mathématique française un certain nombre de "trous", dus en grande partie à l'absence de diversification liée aux problèmes de recrutement des années 75-85. Par trou, entendons un domaine où l'activité en France est relativement faible. Bien qu'il n'y ait pas lieu de vouloir à tout prix tout couvrir, un certain nombre de ces trous concernent des domaines importants pour les applications et les interactions, internes ou externes. Citons comme exemples :

- la géométrie intégrale (aux deux sens du terme, analytique à la Gel'fand, ou plus géométrique à la Santalô),

- certaines parties de la géométrie algébrique (variétés de dimension trois : théorie de Mori),

- les mathématiques de la vision, et, plus généralement l'analyse d'images : il y a nécessité d'une synthèse sur ce sujet,

- la simulation géométrique et la visualisation de résultats numériques, provenant aussi bien d'équations aux dérivées partielles que d'équations algébriques; elles jouent un rôle expérimental de plus en plus important, et les mathématiciens devraient s'y intéresser plus,

- l'algèbre commutative et ses interactions avec la combinatoire, ainsi que l'élargissement du champ du calcul formel,

- la théorie moderne des fonctions spéciales, liée à la théorie des représentations : ceci est important pour les interactions avec la physique théorique,

- certaines parties des interactions avec la physique (théorie quantique des champs, groupes quantiques, physique statistique, vus du point de vue des mathématiciens),

- les théories de jauge et les variétés différentielles de dimensions trois et quatre,

- les mathématiques discrètes (combinatoire, ...), Le CNRS est d'ailleurs en train de créer à Luminy un Institut consacré à ce thème, mais il importe que les mathématiciens soutiennent résolument cette initiative,

- les systèmes complètement intégrables : quelques personnes travaillent en France, et de façon performante sur le sujet, mais leur nombre demeure trop restreint : la masse critique n'est pas atteinte.

## 2 - L'ORGANISATION DES INTERACTIONS

Notons d'abord que si les actions d'organisation ont leur utilité pour encourager les chercheurs qui se sont spontanément lancés dans des domaines d'interaction, le développement de celles-ci passe surtout par la formation interdisciplinaire des étudiants futurs chercheurs.

L'organisation de ces actions est encore très insuffisante. En ce qui concerne, par exemple, la communication entre mathématiciens et physiciens, les deux principaux outils institutionnels sont :

- la RCP 25 de Strasbourg qui fonctionne depuis une trentaine d'années sur la base de réunions

semestrielles. On a pu observer l'évolution des thèmes, aussi bien du côté des mathématiques que du côté de la physique théorique, au gré des courants forts d'un côté ou de l'autre. Strasbourg est devenu ainsi un endroit canonique où un théoricien peut localiser le genre d'information dont il présente pouvoir trouver l'usage;

- l'école d'été des Houches, depuis une vingtaine d'années. Une école assez remarquable eut lieu en 1989 sur le thème "Physique théorique et théorie des nombres".

Ajoutons à cela le Laboratoire *d'Analyse Non Linéaire* de Nice, qui vient d'être créé comme Unité Mixte du CNRS, et l'UPR de Luminy, dont, un des axes est situé en théorie mathématique du génome.

Après un certain retard au départ, la France participe activement aux développements des mathématiques "quantiques". C'est notamment Strasbourg qui semble conduire le mouvement. Le rôle du CNRS pourrait être essentiel pour attirer des spécialistes étrangers de premier plan de ces domaines, notamment les ex-Soviétiques (l'école de Leningrad était à l'avant-garde de toutes ces théories), ce qui a justement été commencé à Strasbourg,

D'autre part, les interactions entre mathématiques et informatique sont encore plus difficiles du fait que ces deux disciplines appartiennent à deux départements différents du CNRS : SPM et SPI.

Le GDR *Mathématique et Informatique*, créé par le département SPI et soutenu par le département SPM, joue un grand rôle de structuration de la communauté. En ce qui concerne le calcul formel, le GDR *Médecis*, créé par SPM, se propose de développer le calcul formel et plus généralement les mathématiques effectives. L'implication de plus en plus grande des mathématiciens dans ces domaines paraît de bon augure. L'existence de postes fléchés sur ces thématiques est une excellente chose.



## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

La nature de la discipline, où les investissements lourds hors personnel (bibliothèques, informatique) sont peu dépendants d'options scientifiques pour le moment, font que, malgré son (trop) faible poids relatif en mathématiques, le CNRS a joué un rôle déterminant. Il peut continuer à le jouer s'il s'adapte à la diversification des mathématiques. En fait, les axes d'action du CNRS, à part la poursuite du soutien de la recherche fondamentale, pourraient être dominés par l'idée d'accompagner la demande de diversification comme suit :

- Augmenter le recrutement de jeunes pour pouvoir en lancer un certain nombre sur des pistes nouvelles, ce que l'Université, malgré son grand nombre de postes, est relativement moins en position de faire en ce moment,

- Renforcer le potentiel d'encadrement DR : ceux-ci, ayant plus de temps que les universitaires (en gros), devraient explorer les possibilités nouvelles pour y lancer des jeunes sans prendre de trop gros risques, tout en continuant bien sûr à faire progresser les domaines où nous sommes déjà de bon niveau. Rappelons, s'il en est besoin, que particulièrement en mathématiques il est difficile, sinon impossible, de prévoir quels sont les résultats qui se révéleront utiles demain.

- Détachements de professeurs pour améliorer l'encadrement et leur recherche,

- Soutenir un certain nombre de directions, que nous citerons plus loin. Ce soutien, ainsi que l'encouragement à la diversification, pourraient utiliser les moyens suivants, dont certains ont déjà commencé à être mis en place.

- Création d'unités. Il faut multiplier les initiatives telles la création de l'*Institut de Mathématiques Discrètes* (Luminy), et il est fondamental qu'une étude préalable fine soit réalisée, par exemple pour

décider de son caractère spécialisé à un thème fixe ou généraliste.

- Postes roses ou rouges pour inviter des étrangers à venir apporter leur compétence dans des domaines où nous sommes un peu faibles. Ces postes doivent être planifiés avec une avance suffisante pour que le processus d'invitation puisse être effectif.

- Années spéciales et appels d'offres dans des domaines assez précis.

- Soutien aux laboratoires organisant des actions de formation pour des étudiants de DEA. Dans cet esprit, le CNRS pourrait s'investir plus dans les lieux où sont formés les futurs chercheurs, surtout pour encourager des formations pluridisciplinaires (mathématiques/physique, mathématiques/biologie, mathématiques/informatique).

- Ecoles d'été pour encourager les interactions, prenant ainsi exemple sur les Houches.

Notons un point où le CNRS a une action positive : alors que les thèses en mathématique ont tendance aujourd'hui à se faire de façon trop rapide, en particulier sous la pression des postes à pourvoir, les chercheurs du CNRS non thésés consacrent souvent plus de temps à ce travail, évitant ainsi un risque de spécialisation excessive et prématurée. De même, il importe que le CNRS se préoccupe de la formation post-doctorale de ses chercheurs.

Ajoutons enfin que si le souci du CNRS de chercher une certaine "Visibilité" en mathématiques est compréhensible, il importe que cette visibilité soit de très bonne qualité et ne se ramène pas à suivre des modes. L'encouragement aux efforts longs et soutenus ne doit pas faiblir. Longue est la liste des thèmes que le CNRS doit encourager par son soutien. Sans avoir l'ambition d'être exhaustifs, donnons une première liste :

- équations aux. dérivées partielles non linéaires, propriétés qualitatives des équations aux dérivées partielles,



- mathématiques discrètes (cf. Luminy), interactions avec le traitement des données issues du séquençage du génome,
- algèbres d'opérateurs,
- théorie du contrôle et problèmes inverses,
- algorithmique parallèle,
- géométrie sous toutes ses formes, en particulier la géométrie semi- algébrique et la géométrie des systèmes dynamiques et spécialement des phénomènes ergodiques,
- géométrie arithmétique,
- théorie des nombres, en particulier dans ses aspects calculatoires,
- analyse, en particulier analyse microlocale et analyse non linéaire,
- probabilités et statistiques.

Il faut bien sûr ajouter à cette liste celle des "trous" mentionnés plus haut. Toutefois il convient d'être prudent et surtout de garder l'esprit ouvert.

Dans les domaines des mathématiques appliquées dont le développement au CNRS est récent, par exemple le calcul formel, il est normal d'évaluer en Comité National les résultats obtenus depuis cinq ans et la qualité de leur "retour amont" vers la recherche fondamentale comme de leurs applications industrielles. Le même travail est à faire, de manière prospective, avant d'impliquer le CNRS dans de nouveaux sujets, comme, par exemple, les mathématiques financières.

temps déjà elle Tétait de par son besoin de bibliothèques (qui restent encore aujourd'hui l'outil de base de son travail). Elle Test encore bien davantage par la nécessité de l'ordinateur, qui après avoir été flagrante pour l'analyste numéricien ou le statisticien, devient peu à peu incontournable pour toute la communauté.

En mathématiques tout au moins, ce que le CNRS pourra mettre sur les équipements sera toujours une part minime de l'effort que peut faire l'industrie. Le CNRS doit se concentrer essentiellement sur les aspects théoriques. Cette intervention doit passer par les Unités de Recherche (Associées ou Mixtes), mais aussi passer par un soutien à l'IHES, au CIRM, à l'ITHP...

Il est fondamental d'intégrer une collaboration accrue avec les mathématiciens des pays de l'Est, notamment russes : cette collaboration doit développer des aspects humains (postes, collaborations avec les centres de recherche locaux) et scientifiques : développement de nouveaux thèmes, notamment à la frontière de la physique (groupes quantiques, systèmes intégrables), mais aussi ailleurs : algèbres d'opérateurs, singularités...

## 2 - SUGGESTIONS "STRUCTURELLES"

Par sa conception même, le CNRS est l'organisme le mieux armé pour mettre en œuvre une politique intelligente et dynamique de la recherche en mathématiques. Pour définir ou encourager des axes prioritaires, le CNRS dispose d'une panoplie de moyens, qui ont fait leurs preuves récemment : la création bien choisie de laboratoires, ou mieux, d'instituts; la création de GDR pour favoriser les activités inter-disciplinaires; la déclaration d'années spéciales; le fléchage des postes.

Pour améliorer le tissu de la recherche, il faut poursuivre l'effort entrepris en faveur de la province, qui doit s'accompagner de la mise en place de bibliothèques de référence, de moyens informatiques performants, de recrutement de cadres À, qui

sont mieux à même que des universitaires pour diriger et orienter les jeunes chercheurs en raison de leur meilleure disponibilité. A nouveau, l'affichage des postes est essentiel. Il faut aussi assurer un flux d'entrée soutenu et favoriser la mobilité par les détachements, les postes roses, la création d'emplois post-doctoraux.

Enfin, on préparera l'avenir en soutenant les formations pluri-disciplinaires (mathématiques-physique, mathématiques-informatique, mathématiques-biologie, mathématiques-sciences humaines), peut-être en profitant du cadre des magistères puisqu'on trouve ceux-ci dans les principaux centres de recherche mathématique.

Pour terminer, souhaitons que le CNRS continue de préserver l'unité "politique" des mathématiques malgré les oscillations des CCU, CSU et autres CNU. La science française a tout à y gagner

Par ailleurs, l'ouverture (hautement souhaitable) vers l'industrie demande davantage de disponibilité par rapport aux tâches d'enseignement. Il faut donc un nombre raisonnable de chercheurs à temps plein dans ce créneau, ce qui est loin d'être le cas, les salaires du CNRS n'étant pas compétitifs

par rapport à ceux de l'industrie. Il faut aussi que, dans ce domaine où l'efficacité ne se mesure pas uniquement en nombre de théorèmes, la carrière des chercheurs puisse se dérouler à une vitesse normale. Enfin, pourquoi ne pas envisager, comme dans d'autres secteurs (biologie, chimie), la création d'unités ou de projets communs CNRS-Industrie ?

L'Ecole mathématique française demeure l'une des toutes premières du monde. Mais ce n'est que par une gestion attentive de la discipline qu'elle le restera : les choix, tant numériques (nombre d'étudiants dans les filières de mathématiques), que qualitatifs seront déterminants. Ces derniers doivent prendre en compte l'équilibre entre le développement indispensable du cœur de mathématiques "pures" - en particulier, il convient de veiller à ce que les "savoirs"<sup>11</sup> ne disparaissent pas -, et les relations avec les autres sciences. Langage et outils pour celles-ci, les mathématiques doivent savoir y puiser de nouvelles sources de problèmes.

**Jean-Claude Sikorav**  
**Bernard Prum**  
*Rédacteurs du groupe 01*

# 02

## SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

### INTRODUCTION

Les enjeux économiques, culturels, sociaux et bien sûr scientifiques des sciences et technologies de l'information (STI) sont considérables. La présence de l'informatique et de tous les types de traitement de l'information dans les activités humaines est devenue un fait incontournable. Les STI ont parcouru un vaste chemin depuis leur fondement dans les années quarante par Norbert Wiener, Claude Shannon, Alan Turing et John von Neumann. Ces pères avaient hérité à leur tour de traditions techniques et intellectuelles, à la fois dans le domaine de l'automatique et dans celui de la logique.

La notion d'information, loin de connaître un enfermement disciplinaire qui l'aurait cantonnée dans une définition unique, a pris sens dans un champ scientifique s'élargissant. L'organisation même de ce chapitre en témoigne, qui part de la machine informatique elle-même, en tant qu'elle réalise le traitement de l'information, passe par les systèmes automatisés et les méthodes d'extraction et d'interprétation de l'information contenue dans les signaux et les images, débouche sur des exemples de traitements de très gros volumes d'information et conclut sur le statut de l'information dans notre société.

Informatique, automatique et traitement du signal manipulent des informations à un niveau plus ou moins proche du signal physique, ou au contraire du concept abstrait qui doit être représenté. Ce sont des sciences pour l'ingénieur (SPI), n'ayant pas pour seul objectif la compréhension et l'analyse du réel, mais encore une action et une emprise sur lui. Ces disciplines ont vu croître l'interdépendance de leurs méthodologies et de leurs technologies respectives, tout spécialement depuis l'avènement du calcul discret, numérique ou symbolique, ainsi qu'il apparaîtra à la lecture.

Mais le concept d'information irrigue bien d'autres disciplines. La troisième partie illustre cette interdisciplinarité à l'aide d'exemples choisis, issus des sciences de l'univers (terre et univers), de la vie (génomique) et de l'homme (langage). Elle montre non seulement l'aide apportée aux autres disciplines par les STI, mais encore les problématiques originales posées aux STI par la nécessité de représenter et modéliser efficacement l'information que manipulent les autres sciences.

La fin de ce chapitre aborde le vaste et important problème du rôle de l'information dans la société. Le rôle croissant de l'information et notamment de l'information scientifique, technique, économique et sociale dans les sociétés modernes rend nécessaire le développement de recherches

pour évaluer l'impact de cette information sur les organisations et sur les hommes, sur l'équilibre des pouvoirs ainsi que sur les processus de décision. Ceci met en jeu des disciplines très diverses dont l'interaction avec les sciences de l'information est jugée riche en développements futurs mais reste encore à l'état préliminaire et doit être fortement encouragée par le CNRS.

Ces quelques lignes illustrent la fécondité d'une approche interdisciplinaire de la science. Mais l'entreprise qui consiste à faire dialoguer plusieurs communautés scientifiques est difficile ! L'un des moyens les plus efficaces pour y parvenir est la promotion par le CNRS des groupements de recherche (GDR) qui permettent de véritables rencontres, et fédèrent des projets de recherche.

Dès avant le démarrage des grands projets stratégiques européens, les communautés scientifiques des STI se sont organisées en Europe et ont mis en place des sociétés savantes. Celles-ci ont promu congrès et revues de haut niveau en informatique, automatique et traitement du signal.

## INFORMATIQUE

La vitalité de l'industrie informatique et électronique est une des clés de l'indépendance et de l'avenir économique d'un pays comme la France ou d'un continent comme l'Europe. En raison de la rapidité d'évolution de ce domaine compétitif, cette vitalité ne peut être entretenue que sur un terrain riche en innovations scientifiques, afin d'améliorer les performances et la fiabilité des ordinateurs, depuis les circuits qui servent à les construire jusqu'aux logiciels qui permettent d'exprimer leurs fonctionnalités.

Le statut de la machine à traiter l'information change. Tout en conservant et en amplifiant son rôle d'assistant technique pour des tâches dont la taille ou la complexité sont hors de portée des capacités humaines, elle investit maintenant d'autres

places, celle de partenaire de l'homme et celle d'agent autonome. Cette machine atteint un niveau de complexité que seule une démarche alliant théorie et expérimentation peut maîtriser : l'informatique affirme désormais fortement son identité comme discipline scientifique.

## 1 - LES SUPPORTS PHYSIQUES ET LES TECHNOLOGIES

Les performances actuelles des ordinateurs, ainsi que celles des machines de traitement du signal, résultent de quarante ans de développement des technologies des semi-conducteurs, en particulier du silicium. Le chapitre "Modélisation, simulation, moyens informatiques" de ce Rapport de conjoncture montre que les besoins en puissance de calcul sont loin d'être satisfaits : la poursuite de recherches pour augmenter encore la capacité des systèmes de traitement de l'information, et amener les technologies à leurs limites fondamentales est nécessaire. Le CNRS y contribue en proposant soit l'exploitation de phénomènes physiques nouveaux, soit la conception d'architectures nouvelles, comme expliqué plus loin.

Le transistor à effet de champ est opérationnel jusqu'à une longueur de grille de quelques dizaines de nanomètres. Au-delà, l'interaction électrostatique des porteurs avec la grille s'affaiblit et il n'y a pas d'effet transistor marqué. Des recherches portent sur la physique de base et sur les méthodes d'élaboration des matériaux semi-conducteurs massifs ou en hétérostructures pour la microélectronique; on peut y rattacher le développement de micro-capteurs, qui permettent de mesurer directement sur la puce "une pression ou une accélération, et celui des micro-actionneurs, tous deux intégrés au silicium. La lithographie par rayons X permet d'envisager *des* structures de composants à l'échelle de la dizaine de nanomètres.

Des travaux fondamentaux sur l'optique non linéaire, dont la maîtrise théorique et expérimentale est un enjeu important, pourraient offrir un jour



des alternatives performantes à la logique tout électronique. Ces nouvelles technologies pourraient améliorer les performances de certains éléments clés des architectures matérielles, comme les interconnexions dans les machines et les communications entre machines. Les nouvelles structures électroniques présentent des propriétés optoélectroniques de modulation et d'émission de la lumière qui, déjà essentielles pour les télécommunications à haut débit, pourraient également apporter un renouveau à tous les niveaux des technologies d'interconnexion.

Un autre point sensible est l'accès rapide à la mémoire, comme le montre la complexité croissante de la hiérarchie mémoire des architectures. Les recherches sur les mémoires magnétiques connaissent un nouvel essor, et on se penche à nouveau sur les composeurs de pages holographiques. En ajoutant au volume de stockage une quatrième dimension, la fréquence, les dispositifs à *"hole burning"* spectral (HB) pourraient stimuler le développement des mémoires holographiques. Par ailleurs, en permettant l'adressage temporel d'hologrammes spectraux, le phénomène HB devrait permettre la mise au point de pages mémoires à accès rapide.

A côté d'autres grands organismes Français - Alcatel Alsthom, le CEA, France-Télécom, Thomson -, le CNRS manifeste nettement sa présence sur le thème des technologies limites : les plans d'action des départements SPI et des Sciences physiques et mathématiques du CNRS, le programme Ultimatech mettent en avant les "structures artificielles" à dimensionalité réduite et leurs applications, les technologies d'intégration monolithique, l'association entre électronique et optique; le thème "Optique et électronique" du présent *Rapport de conjoncture* rend compte de ces sujets.

## 2 - CIRCUITS, ARCHITECTURES, LOGICIELS

Les travaux du CNRS portent aussi sur la conception de nouveaux systèmes de traitement de l'information. Ceci implique l'interaction de plu-

sieurs techniques : circuits intégrés, architectures matérielles et logicielles, qui font l'objet d'études complémentaires.

### Circuits intégrés

Les technologies submicroniques permettent la réalisation de circuits intégrés dont les capacités de traitement atteignent celles des premiers supercalculateurs, tandis que les technologies mixtes (numérique-analogique, BiCMOS) permettent de rassembler sur un seul circuit des fonctions (acquisition, traitement, commande) qui étaient séparées jusqu'à présent. Elles rendent donc possible la conception de systèmes intégrés, dont la maîtrise est un enjeu stratégique pour tous les secteurs de l'industrie. Quelques filières de composants GaAs ont déjà atteint le stade industriel.

L'utilisation des technologies submicroniques a pour conséquence un accroissement de la complexité de conception des circuits, et elle soulève de nombreuses questions scientifiques relatives à la modélisation des transistors, à l'organisation, à la conception et au test des circuits.

L'organisation des circuits intégrés est envisagée à plusieurs échelles. La circuiterie est étudiée pour les circuits analogiques, les circuits BiCMOS et les circuits logiques rapides, dans le but de proposer des cellules innovant par leurs fonctionnalités ou leurs caractéristiques. La VLSI analogique, les circuits auto-testables, les circuits intégrés de traitement massivement parallèles sont des thèmes de recherches qui combinent des études de circuits, de sûreté de fonctionnement et d'architectures.

D'autres recherches portent sur les outils de conception de circuits assistée par ordinateur. Elles visent à accroître la vitesse et la sûreté de conception des circuits complexes, et à prendre en compte les particularités des technologies submicroniques et mixtes. Elles portent d'une part sur les méthodes de conception, de synthèse, de preuve et de test, d'autre part sur les logiciels permettant la mise en œuvre de ces différentes méthodes.

Avec France Télécom et les laboratoires du CEA, la recherche française couvre tous les domaines d'actualité. Les réalisations restent cependant en retrait par rapport aux Etats-Unis et au Japon, où l'environnement, industriel en particulier, est plus favorable au développement de ces recherches qu'en France ou même en Europe. Le "Groupement Circuits Intégrés Silicium" (GCIS) a joué un rôle irremplaçable dans la structuration de la communauté du CNRS et de l'Université, et le financement de type PRC que lui ont accordé le Ministère de la Recherche et de l'Espace et le Ministère de l'Education Nationale reste une condition *sine qua non* de l'existence d'une activité de recherche dans ce domaine expérimental. Une synergie fructueuse s'est établie entre le GDR "Circuits Multi-Projets", qui a fourni les moyens de prototypage, et les actions d'enseignement du Centre National de Formation à la Microélectronique et du projet ESPRIT/BRA "VLSI Design Action".

## Architectures d'ordinateurs

L'évolution des technologies suscite et impose de nombreuses innovations dans les architectures d'ordinateurs, comme Ta montré l'avènement des microprocesseurs RISC. La poursuite de ces innovations implique des recherches dans plusieurs directions, en interaction avec d'autres champs scientifiques.

Les recherches sur la conception d'architectures parallèles sont menées en interaction avec les travaux sur les systèmes d'exploitation, les langages de programmation et l'informatique théorique : choix de modèles d'exécution statiques ou dynamiques, ordonnancement, placement et migration de tâches sur les processeurs, relations entre l'architecture et la parallélisation automatique ou la compilation, équilibre entre calculs et communications, algorithmique parallèle, évaluation de performances. L'émergence des architectures massivement parallèles ouvre de nouvelles perspectives aux disciplines scientifiques et aux secteurs industriels qui recourent à la simulation numérique et au traitement en temps réel de données massives.

Par ailleurs, de nouvelles architectures spécialisées sont proposées, en interaction avec les algorithmes qu'elles exécutent. Elles recourent le plus souvent à des circuits intégrés spécifiques. Le traitement du signal et de l'image, et les réseaux de neurones formels, sont des domaines d'interaction privilégiés.

D'autres recherches portent sur les méthodes de conception d'architectures assistée par ordinateur. Elles impliquent l'étude de la spécification, de la modélisation, de la simulation et du partitionnement des architectures. La synthèse d'architectures spécialisées, la conception simultanée du matériel et du logiciel, la tolérance aux fautes, la sécurité d'accès aux informations, sont des exemples de domaines actifs. Enfin les recherches qui portent sur la prise en compte de l'influence des technologies nouvelles sur l'architecture, comme par exemple les technologies non silicium, l'optoélectronique ou les liaisons série à haut débit, sont menées en relation avec l'électronique et l'optique.

Le rôle du CNRS et de l'Université est essentiel, du fait de l'action modérée des grands organismes (ONERA, INRIA) dans ce secteur. Le PRC "Architectures Nouvelles de Machines" a joué un rôle irremplaçable dans la structuration de la communauté nationale, et le financement que lui ont accordé le Ministère de la Recherche et de l'Espace et le Ministère de l'Education Nationale conditionne la poursuite d'une activité de recherche dans ce domaine clé. Une complémentarité s'est établie entre, d'une part, le GCIS et le PRC "Coopération, Concurrence, Communication"<sup>11</sup> (C3) et, d'autre part, des actions d'enseignement de l'architecture, comme par exemple le Réseau Doctoral en Architecture. Les interactions ont été confortées par le GDR "Traitement du Signal et de l'Image", et des actions pluridisciplinaires comme le Club Optique dans l'Ordinateur, le Cercle d'Optoinformatique et le programme Cognisciences.

## Programmation et génie logiciel

La construction de programmes obéit à la même évolution que l'ensemble des activités liées

à la conception et la réalisation des systèmes informatiques, depuis le matériel jusqu'au logiciel : la taille croît, la structure, le comportement et les fonctions réalisées sont de plus en plus complexes, les exigences de fiabilité deviennent souvent prioritaires. Maîtriser cette complexité est une nécessité quand il s'agit de logiciels qui contrôlent des systèmes dont les défaillances peuvent mettre en jeu l'environnement ou des vies humaines ; on voit naître la notion de "logiciels zéro défaut" dans des domaines comme par exemple le contrôle automatique de grandes installations technologiques ou l'assistance au pilotage d'avions.

La conception et la construction de logiciels complexes et de très grande taille, la garantie de leur fiabilité, demandent à la fois le développement de travaux théoriques et des études de faisabilité au moyen de réalisations expérimentales. Le génie logiciel, la programmation, l'algorithmique, domaines centraux de l'informatique, voient ainsi leurs avancées les plus significatives très largement fondées sur des travaux théoriques en algèbre et en logique.

La construction de logiciels utilise des langages, qui proposent plusieurs styles de programmation : par objets, applicative, par réécriture, logique, par contraintes, parallèle, temps réel. Toutefois, les langages ne sont plus, depuis longtemps, des outils suffisamment riches pour répondre à tous les problèmes de la construction de logiciels complexes. Ils doivent être placés dans des environnements qui permettent de conduire l'activité de développement depuis la spécification formelle initiale jusqu'à un produit correct et efficace. En plus des compilateurs, ceci requiert des outils de preuve symbolique ou probabiliste, des méthodes de test fondées sur des principes rigoureux, des mécanismes d'analyse de performances, des environnements pour la réutilisation de composants logiciels et la gestion de versions. La notion même de compilation s'élargit : optimisation, transformation, parallélisation, interprétation abstraite, évaluation partielle. On constate aussi la place croissante prise par les travaux sur l'évaluation de la fiabilité, la tolérance aux fautes logicielles et la dérivation systématique de programmes à partir de leurs spécifica-

tions. L'ensemble de ces questions constitue l'objet des recherches en génie logiciel

Ce sont le parallélisme, le temps réel et les architectures distribuées qui ont ouvert le plus grand nombre de questions nouvelles à la recherche en programmation et génie logiciel. Le développement de modèles et d'outils pour la programmation parallèle est toujours une question d'actualité : algèbres de processus, logiques temporelles, *"model-checking"*, algorithmique parallèle, complexité, analyse de performances, langages, Il en est de même pour le temps réel, avec la spécification, la programmation et la vérification des systèmes réactifs synchrones, dont les applications sont parmi les plus exigeantes en logiciels "zéro défaut". L'étude et la réalisation d'architectures distribuées, avec les réseaux de communication et les systèmes répartis, suscitent un renouveau très vif des recherches en France sur ces questions : réseaux à haut débit, réseau multi-média, logiciels de base, liens avec les organismes de normalisation.

Dans ces domaines, la plupart des laboratoires du CNRS concernés participent à des coopérations européennes dans le cadre du programme ESPRIT, en particulier au sein d'actions de recherche de base (BRA). Au niveau national, les PRC du Ministère de la Recherche et de l'Espace et GDR du CNRS "Programmation Avancée et Outils pour l'Intelligence Artificielle" et C3, qui fédèrent chacun plusieurs dizaines d'équipes, contribuent très efficacement à la vitalité de l'école française en programmation et logiciel.

### 3 - L'INFORMATIQUE-PARTENAIRE

La machine à traiter l'information devient partenaire de l'homme dans une gamme d'activités de plus en plus large : création artistique, conception de produits industriels, pilotage d'avions, diagnostic médical, composition de textes, jeux, etc. La machine manipule des informations symboliques ou graphiques, anime des images, conduit des raisonnements, élabore et explique des propositions;



l'homme choisit, modifie, suggère d'autres voies : le dialogue, à travers plusieurs modalités, s'installe. Cette mutation prend appui sur des recherches où non seulement il s'agit de généraliser la nature des traitements effectués par l'ordinateur, qui deviennent alors plus des raisonnements sur des connaissances que des calculs sur des données, mais où il s'agit aussi d'enrichir les facultés de dialogue de la machine et de rendre plus naturels à l'homme ses canaux d'émission et de réception d'information.

Quand on se place dans ces perspectives, il devient nécessaire de gérer les processus de construction de référentiels communs entre systèmes artificiels et systèmes humains (individus et organisations sociales). Chaque système a en effet ses capacités et ses contraintes spécifiques pour articuler des niveaux différents de traitement et pour user de modes variés de représentation externe (textes et paroles, graphismes, gestes et postures) dans la compréhension d'une situation et dans l'accomplissement d'une tâche.

## Bases de données

Les travaux sur les bases de données occupent une place intermédiaire entre l'informatique classique et cette informatique-partenaire. Après les bases de données relationnelles, qui ont fait l'objet de recherches pendant une vingtaine d'années, puis les bases de données logiques inspirées de la programmation logique, les travaux se concentrent maintenant sur les bases de données "orientées-objets" et les bases de données multi-média (informations numériques ou symboliques, mais aussi textes, sons, images). Dans ce domaine, des amorces de l'informatique-partenaire sont déjà présentes. On y trouve des travaux sur des langages de requêtes sur une mise en forme des réponses proches du langage naturel et sur l'utilisation de symbolismes graphiques, d'images et de sons dans l'interaction homme-machine. Les questions relatives à la sécurité de l'accès aux informations y sont toujours présentes, et les considérations d'ergonomie y prennent une place de plus en plus importante.

## Inférence et représentation des connaissances

La mécanisation du raisonnement et la représentation des connaissances font l'objet de recherches de plus en plus actives. C'est l'un des sujets traditionnels d'étude en intelligence artificielle (IA). On cherche à modéliser diverses formes de raisonnement (déduction en logique, raisonnement sur l'incertain et sur l'évolutif, raisonnement qualitatif, hypothétique, diagnostic, classification, généralisation, apprentissage, systèmes multi-agents). L'approche symbolique, issue de la logique, y a toujours une place prépondérante. Les modèles fondés sur la notion d'objets permettent d'envisager de grandes bases de connaissances. Les réseaux neuromimétiques y ont peu à peu gagné du terrain et prennent aussi leur place dans l'étude de systèmes hybrides où leurs capacités d'apprentissage sont exploitées. Les applications sont souvent des systèmes experts, où la machine doit expliquer les raisonnements qu'elle a élaborés. L'acquisition des connaissances de l'expert humain fait aussi partie des questions étudiées dans ce domaine.

Mais c'est toujours la déduction automatique en logique qui demeure le fondement de ces travaux. À la fois en IA et en informatique, c'est un domaine de recherche qui contribue aux fondements théoriques de l'informatique (voir ci-après : *4 - Les fondements théoriques*). On assiste depuis plusieurs années à un renouveau des travaux sur cette question, suscité par l'intérêt pour d'autres logiques que la logique classique comme les logiques modales (temporelles, probabilistes, épistémiques, déontiques) ou les logiques multivaluées. Ces recherches sont le lieu de travaux théoriques aussi bien qu'expérimentaux de grande ampleur, comme par exemple des systèmes qui couvrent le spectre allant de la preuve entièrement automatique à la vérification de preuve, la situation "normale" étant la coopération homme-machine pour la construction d'une preuve. Les questions liées au dialogue avec l'utilisateur ne sont pas absentes de ces travaux, ce dernier devant pouvoir comprendre et agencer les preuves élaborées par la machine.



## Communication homme-machine (CHM)

Pour une informatique-partenaire, la machine doit percevoir, comprendre et produire des signaux humains. Le langage naturel, parlé et écrit, est l'un des supports de cette communication entre l'homme et la machine. Les recherches dans ce domaine sont nécessairement pluridisciplinaires : le traitement de la parole, mais aussi les sciences du langage sont concernés : linguistique, raisonnement, psychologie cognitive (voir ci-après *Langages naturels et information*).

L'image est un autre canal de communication entre l'homme et la machine. Le domaine d'application privilégié a longtemps été la conception assistée par ordinateur, en particulier en mécanique, où les formes représentées peuvent être connues et modélisées exactement. Aujourd'hui, les applications médicales, comme par exemple le geste médico-chirurgical assisté par ordinateur, apportent au domaine des images un ensemble de problèmes particulièrement riche, comme la fusion d'images multi-sources et la reconstitution d'images en trois dimensions (voir ci-après *Robotique - Vision artificielle*). La production d'images réalistes (scènes naturelles, architecture et urbanisme, par exemple) est maintenant un objectif majeur des travaux sur l'image, dont la problématique déborde largement la CHM. Ainsi, le domaine de l'infographie, avec la manipulation d'images, est maintenant appréhendé au niveau mathématique le plus théorique, en géométrie discrète et en algorithmique géométrique, et rejoint bien des questions qui se placent dans les fondements de l'informatique.

Récemment, on a vu naître sous la dénomination (contestable) de "réalités virtuelles", un ensemble d'études et de réalisations où la relation recherchée entre l'homme et un monde physique simulé par la machine est de même nature que celle qu'il a avec le monde physique naturel, dans lequel il interagit par des gestes, et où ces gestes prennent leur sens au travers des réactions visibles, audibles, tactiles, simultanées et cohérentes qu'il

perçoit. Dans ce domaine, certaines approches fondées sur l'utilisation de modèles physiques sont particulièrement prometteuses. Les applications vont des simulateurs de vol à la création artistique assistée par ordinateur (musique, images animées).

Plus généralement, la relation entre l'homme et la machine devient multisensorielle. Le dialogue passe, dans les deux directions, à travers plusieurs canaux (parole, langues naturelles, texte manuscrit, image, geste) qui ont leur problématique et leurs fondements théoriques propres. Ceci a donné naissance aux travaux sur la "communication muulti-modale", où il s'agit de coordonner de façon ergonomique ces modalités de façon à tirer parti de leur complémentarité.

## La machine autonome

Au-delà de ses capacités de partenariat avec l'homme, l'ordinateur commence aussi à être doté de capacités de relations directes avec le monde physique réel qui l'entoure : capteurs, micro-capteurs intégrés de toutes natures et caméras pour la perception, bras et plates-formes mobiles pour l'action. L'interprète humain, qui était jusqu'alors nécessaire, dans les deux directions, entre la machine et la réalité du monde qui lui est extérieur, voit son rôle s'effacer : une certaine autonomie est à la portée de la machine. Ces recherches, qui sont décrites plus loin au sous-chapitre *Robotique - Vision artificielle*, marquent en profondeur le devenir de la machine informatique et posent aussi de façon aiguë le problème de la sûreté de fonctionnement. Elles visent à doter la machine de facultés de perception, comme la vision dans un contexte mal connu, incomplètement modélisable, évolutif. La robotique mobile, où la machine se déplace dans un environnement non structuré, est la référence privilégiée pour ces travaux sur l'autonomie et l'intelligence, où perception et action doivent coopérer.

L'une des conséquences de cette évolution de la machine vers l'autonomie est que les investigations de l'IA débordent très largement leur terrain traditionnel. Perception, fusion multisensorielle, rai-

sonnement, connaissances et action font désormais partie d'un vaste ensemble de problèmes complémentaires, pluridisciplinaires, qui intéressent à la fois l'informatique-partenaire et la machine autonome. Une autre conséquence est l'apparition d'une dualité entre ces perspectives élargies de HA, qui place un agent intelligent artificiel dans le monde physique réel, et les "réalités virtuelles", qui mettent l'homme en situation d'agent dans un monde physique virtuel. Ceci est riche de développements à venir, que l'on voit poindre sous la forme de la "téléopération différée", ou encore "téléprésence", par exemple en robotique spatiale.

En France, les recherches sur Tinformatics-partenaire et sur la machine autonome bénéficient des PRC du Ministère de la Recherche et de l'Espace et des GDR du CNRS IA, CHM et "Bases de Données de 3ème génération" (BD3), qui structurent la communauté. Le Groupement Scientifique "Robotique d'Intervention sur Site Planétaire" (RISP) est un lieu de coopération entre les principaux organismes de recherche concernés. Le programme Cognisciences a donné un élan décisif aux projets interdisciplinaires qui sont indispensables dans ce domaine. Les laboratoires du CNRS actifs en IA, CHM, vision et robotique sont aussi très engagés dans des programmes européens comme ESPRIT et Euréka (projet Prométhéus).

## 4 - LES FONDEMENTS THÉORIQUES

Circuits, architectures, logiciels, informatique-partenaire, machine autonome : la complexité de ces systèmes n'est plus maîtrisable si on se contente de faire appel aux recettes. La discipline informatique est entrée dans un âge de maturité; le recours à des modèles théoriques, associé à l'expérimentation comme dans les disciplines scientifiques classiques, peut seul mettre en évidence les concepts essentiels, Matériellement mise en œuvre par l'électronique, mais fondamentalement issue des mathématiques et de la logique, l'informatique revient donc y puiser sa substance et y élaborer ses outils de base.

## Calculabilité, complexité

La logique et la théorie de la calculabilité n'ont certes pas attendu l'informatique pour se développer. Mais c'est aujourd'hui l'informatique qui apporte à ce domaine des mathématiques une bonne partie de sa vitalité. On peut désormais parler d'une logique informatique qui, loin de se réduire à un recyclage de résultats anciens, élargit le panorama de la logique traditionnelle pour construire les théories nouvelles nécessaires à l'étude de grandes classes de problèmes informatiques (voir également le thème "Sciences de la cognition et de la communication"<sup>11</sup> de ce *Rapport de conjoncture*). On y rencontre, par exemple, la théorie de la démonstration, les  $\lambda$ -calculs polymorphes, la logique linéaire, l'algorithmique dite "abstraite" et, plus généralement, des problèmes à la frontière de la décidabilité, En complexité, l'un des problèmes ouverts les plus célèbres est le problème dit P-NP consistant à prouver ou à infirmer qu'il existe des algorithmes polynormaux déterministes qui résolvent certains problèmes de nature combinatoire. En France, les travaux sur la complexité portent surtout sur l'analyse d'algorithmes, et s'ouvrent aux algorithmes probabilistes.

## Logique, sémantique et programmation

Une branche d'activité fort importante est la sémantique des langages de programmation, où la logique intervient dans les preuves de programmes (la logique classique, mais aussi des logiques modales comme les logiques temporelles), la dérivation d'algorithmes, le typage des objets de la programmation. Le parallélisme continue à poser un grand nombre de questions nouvelles, comme par exemple la sémantique du "vrai" parallélisme, qui met en évidence la notion d'indépendance entre actions. Ce domaine rejoint aussi celui de la théorie des automates et des langages dans la mesure où il fait appel à des méthodes syntaxiques, c'est-à-dire à des techniques de manipulation d'arbres et même souvent de graphes, au moyen de grammaires, de systèmes d'équations et de transductions. La pro-

grammation logique, les systèmes de réécriture et la programmation par contraintes sont ainsi à l'origine de développements très importants dans l'étude des algèbres de termes, comme la théorie de l'unification, et les problèmes équationnels.

## Automates et langages formels

Les automates et les langages formels, dont la théorie a ses origines dans les années 50, étudient les algorithmes portant sur les mots, leur transformation, leur reconnaissance et leur manipulation, sur la combinatoire des mots, la théorie des codes, les séries formelles. De nombreux développements ont vu le jour sur la théorie des automates finis, des langages rationnels et de leurs extensions. Le surgissement des travaux sur l'interprétation des séquences génétiques est en train de devenir également une source de problèmes très riche pour la reconnaissance des mots (voir plus loin le sous-chapitre *Génomes et information*). Au-delà des langages rationnels, les recherches actuelles sur les langages algébriques portent sur la classification des familles de ces langages suivant la possibilité de les obtenir les uns à partir des autres par un codage. Dans le domaine des mathématiques classiques, cette théorie s'est révélée être liée à la théorie combinatoire des groupes : on voit qu'il est illusoire de vouloir tracer une frontière entre mathématiques et informatique,

## Combinatoire et algorithmique

La théorie combinatoire énumératrice appartient à la fois aux mathématiques par la théorie des langages et à l'informatique par l'analyse des algorithmes. C'est aussi le cas pour la théorie des graphes au sujet desquels se pose un problème ouvert depuis longtemps : existe-t-il un algorithme raisonnable pour vérifier que deux graphes sont isomorphes ? Cette question est posée dans de nombreuses situations en informatique, comme par exemple la vision par ordinateur. Ces problèmes, aussi désignés sous le terme de "mathématiques discrètes", sont intimement liés à d'autres branches

de l'informatique théorique, en particulier à l'algorithmique.

L'algorithmique ou analyse des algorithmes est un sujet qui a pris son essor avec l'informatique : L'étude des performances des algorithmes n'a en effet de sens qu'en relation avec leur exécution par des ordinateurs. Le but recherché est autant la conception d'algorithmes efficaces que la compréhension de la nature même des algorithmes. L'évolution des architectures d'ordinateurs suscite des travaux fondamentaux sur l'algorithmique parallèle, l'algorithmique probabiliste, les files d'attente, les processus stochastiques, la gestion de mémoires. Des questions théoriques nouvelles, liées à la géométrie discrète et algorithmique, sont aussi issues de la robotique, de la vision par ordinateur et de l'infographie.

Le calcul formel a pour objet la manipulation sur ordinateur de formules et plus généralement d'objets mathématiques où, contrairement au calcul numérique, les variables peuvent demeurer indéterminées. Les travaux en calcul formel combinent souvent des développements de logiciels de grande taille, avec des études mathématiques très élaborées : algorithmique des systèmes d'équations et d'inéquations polynomiales, des équations différentielles ordinaires ou aux dérivées partielles, arithmétique des nombres algébriques, calculs d'invariants, de complexité,... Le calcul formel est souvent complémentaire du calcul numérique, en particulier dans le cadre d'applications comme la robotique ou la modélisation.

La recherche française sur les fondements théoriques de l'informatique est très solidement établie. Plusieurs PRC du Ministère de la recherche et de l'espace et GDR du CNRS contribuent à structurer cette communauté. A côté des PRC "Programmation Avancée et Outils pour l'Intelligence Artificielle", IA et C3, qui couvrent des travaux sur la sémantique, sur la logique et sur le parallélisme, le PRC "Mathématiques et informatique" rassemble la quasi-totalité de la communauté de recherche française sur les sujets qui viennent d'être évoqués, et attire de nombreux mathématiciens vers des thèmes informatiques.



# AUTOMATIQUE, TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'INFORMATION

Le concept d'information est central en automatique et en traitement du signal. On distingue deux types d'informations : une information "*a priori*", ou "*hors ligne*", préalable à l'expérience. C'est celle qui préside à la modélisation du phénomène étudié; une information "*a posteriori*" ou "*en ligne*" apportée par des mesures (les "signaux") effectuées sur ce phénomène. On tire parti des deux pour cibler une action sur l'environnement physique. Automatique et traitement du signal effectuent une interprétation du contenu informationnel des signaux mesurés. Ce sont des disciplines voisines, étroitement imbriquées avec l'informatique qui leur fournit les moyens de cette interprétation.

## 1-AUTOMATIQUE, PRODUCTIQUE

### Définition, situation

L'automatique se définit comme la science de l'analyse, de la modélisation et de la commande des systèmes dynamiques. Ses approches en "Théorie des Systèmes" lui permettent d'intéresser non seulement le domaine des processus technologiques en ingénierie classique, mais également des systèmes de nature plus générale (sociaux, socio-économiques...). L'automatique vise principalement la maîtrise de systèmes dynamiques à évolution temporelle, dans le but d'atteindre des performances désirées (temps de réponse, amortissement, précision...) quels que soient les aléas ou perturbations dus à l'environnement. Les actions correctrices sont généralement prises en fonction d'informations en ligne, mesures effectuées sur le système selon un schéma en boucle fermée, concept de base de l'automatique. S'impose ainsi clairement la notion de temps réel, qui induit un fort couplage entre auto-

matique d'une part et informatique "temps réel" d'autre part. Initialement orientée vers l'étude des systèmes continus, l'automatique a, plus récemment, abordé celle des systèmes à événements discrets où l'on retrouve les mêmes préoccupations avec des outils spécifiques. La productique constitue un domaine d'application privilégié.

La communauté des automaticiens français a été structurée par le CNRS dans un GDR assurant une bonne visibilité des travaux dans le domaine. Ce groupement a permis le renforcement des activités méthodologiques, la mise en commun des potentiels humains et matériels, la confrontation des diverses écoles de pensée. Il a un rôle moteur au plan européen avec, notamment, la création de l'*European Control Conférence*.

### Modèles de représentation et d'évolution

La première étape de l'automatisation est l'élaboration d'un modèle du système. Elle est fondamentale car elle gouverne la qualité de la commande. A l'origine on trouve la définition d'outils systématiques tels que les "*bond graph*", la représentation graphique et fonctionnelle, les réseaux de Petri ainsi que, à partir de données quantitatives, les outils d'identification, d'analyse structurelle...

Il faut ensuite mettre en évidence les attributs essentiels de conception et de commande. Les axes suivants, en particulier, constituent des domaines sur lesquels restent encore des points importants à développer :

- modèles non linéaires (la France possède là un niveau éminent),
- modèles stochastiques en environnement aléatoire,
- modèles pour systèmes à paramètres répartis,
- systèmes multivariables linéaires, systèmes singuliers, ...



Du fait de la complexité induite, les modèles d'évolution quantitatifs (équations différentielles ou récurrentes) sont parfois des représentations incapables de prendre en compte des incertitudes ou une connaissance experte exprimée à partir de règles et de faits qualitatifs observés. Parmi les alternatives possibles, se rencontrent les techniques de l'analyse qualitative et celles des ensembles flous, pour lesquels restent à développer des outils méthodologiques inspirés par exemple de concepts d'intelligence artificielle.

Pour la prise de décision en temps réel, citons finalement la recherche sur les langages synchrones et asynchrones de spécification, conception et développement. Ils fournissent à la fois un mode de représentation et un mode de développement d'applications temps réel (le plus souvent dans un contexte distribué) avec contraintes temporelles dures, liées à la mise en oeuvre.

## Commande : nature, structure

De nos jours la tâche de commande se comprend dans sa globalité, de la spécification à la réalisation, planification, optimisation et décision comprises. La loi de commande est subordonnée au type de représentation choisie. Ceci induit des thèmes de recherche en estimation, stabilisation et commande, dans les deux domaines du non linéaire et des systèmes hybrides continus-discrets, ainsi qu'en commande à base de connaissance (pas forcément quantitative). D'autres problèmes encore largement à explorer découlent des contraintes imposées par la nature même des processus, sur la loi de commande. C'est ainsi le cas de la commande avec information partielle et contrainte de structure (décentralisation, distribution ...), de même que la commande multiniveaux à décomposition fonctionnelle (processus complexes avec horizons d'action différents). On voit là l'interaction avec les recherches sur les architectures de traitement parallèles citées *supra* dans "*Circuits, architecture, logiciels*".

Pour être applicables, les études méthodologiques en identification et commande doivent inté-

grer la spécification de robustesse vis-à-vis des approximations, incertitudes de modélisation, et aléas, perturbations internes ou externes au processus à commander. Tel est le but de la détection en ligne d'anomalies et des travaux sur le diagnostic. La commande adaptative est également une réponse qui intègre une fonction d'auto-apprentissage pour l'amélioration en temps réel des lois de commande. Dans ce domaine, la communauté nationale est bien structurée, et ce, depuis de longues années, ce qui lui assure une importance internationale.

## Productique

La recherche en productique atteint les niveaux de commande supérieurs comme la supervision, l'ordonnancement et la planification. À ce niveau intervient l'opérateur humain, du fait que le système de production est un système socio-technique. D'une part, il peut intervenir explicitement dans la boucle (le système de commande est alors un système d'aide à la décision); d'autre part, c'est lui qui développe le système à commander, tout comme le système de commande. Parmi les thèmes à mettre en avant figurent :

- l'élaboration de modèles formels analytiques pour le calcul de plans et d'ordonnements optimaux, ainsi que pour l'évaluation des performances (processus de décision markoviens, réseaux de files d'attente, etc.);

- le développement d'approches visant la flexibilité décisionnelle pour améliorer la réactivité du système de production vis-à-vis d'aléas (approches par contraintes ou multi-agents), car les entreprises sont organisées sous la forme de réseaux de centres de décision, plutôt que comme hiérarchie rigide;

- l'aide à la conception de systèmes discrets maîtrisant les contraintes temporelles (durées explicites et/ou contraintes logiques découlant de relations d'ordre partiel) grâce aux réseaux de Petri de haut niveau, aux approches à objets, synchrones, etc.

La fiabilité des systèmes dépend également du comportement de "l'homme dans la boucle de commande" qui est l'objet d'études en ergonomie cognitive. Commande et supervision confrontent deux systèmes bien différents de contrôle, l'automatique et l'humain, dont les décisions doivent se coordonner en temps réel. L'automatisme traite des informations discrétisées, numérisées, éventuellement symboliques. Mais l'opérateur humain traite aussi du continu, gère de l'incertain et des ordres de grandeurs. Il intègre aux traitements perceptifs et moteurs à la fois des processus cognitifs automatisés et des raisonnements conscients à base de connaissances, avec une grande flexibilité dans les représentations en jeu (concepts et modèles mentaux) et dans les modalités de traitement (verbal, graphique,...). De plus, systèmes automatisés et humains traitent de variables temporelles différentes et avec des modes de traitement encore très mal connus du côté des humains. Des problèmes de même nature se posent en robotique.

Il faut noter que les systèmes socio-organisationnels introduisent encore un niveau supérieur de régulation collective de l'activité.

Les recherches en ergonomie cognitive sur la gestion d'environnements dynamiques sont en plein essor : la France y occupe une bonne place, au sein d'une communauté européenne active, bien que la visibilité de ce champ de recherche au CNRS soit faible (comme celle de l'ergonomie en général). En ce sens, des structures inter-départements semblent nécessaires.

## 2 - TRAITEMENT DU SIGNAL ET DE L'INFORMATION

### Signal et information

*Les signaux sont le contenant* - c'est-à-dire le support physique - de l'information. La terminologie "signal" avait autrefois la signification de fonction unidimensionnelle d'une seule variable (le

"temps"). Un très bel exemple d'un tel signal est la parole, qui permet la communication orale et le dialogue en langage naturel,

Mais le sens du mot signal s'est généralisé. Les images, les volumes ou encore les signaux d'antenne correspondent à des signaux multidimensionnels. Actuellement les communautés vouées au traitement du signal et des images se sont rapprochées et interagissent dans le GDR Traitement du Signal et Images (TDSI),

Le traitement du signal - ou de l'image - est destiné à en rendre plus accessible *le contenu informationnel caché*. À terme, cette information pourra permettre de cibler une interaction avec l'environnement physique. L'optimisation d'un traitement se base sur une bonne représentation du contexte. Celle-ci est souvent liée à une modélisation *a priori* des signaux et des images, qui découle des informations connues avant toute observation.

La modélisation est souvent probabiliste, signal et information étant deux grandeurs aléatoires statistiquement reliées. Ceci est implicite dans la terminologie même de bruit. La modélisation peut aussi être à base de fonctions. Pour les images, elle est souvent de nature géométrique ou morphologique.

Le développement des ordinateurs numériques qui traitent des signaux préalablement échantillonnés et quantifiés, ainsi que l'apparition des nouveaux capteurs (caméras CCD par exemple) et des systèmes de restitution {réseau RNIS et écrans LCD) tend inexorablement à représenter numériquement tous les signaux analogiques.

### Objectif des traitements

Coder dans un contenant physique approprié l'information que Ton désire transmettre est un type de traitement. À ce titre, la théorie des communications et la théorie de l'information et du codage, ainsi que la cryptographie, font partie de la théorie

du signal, au moins dans l'acception anglo-saxonne du terme "*signal theory*".

Selon le type d'action ou de décision que pilote le contenu informationnel des signaux, leur traitement prend des noms très divers tels que capter; filtrer, débruiter et estimer; reconstruire et restaurer; détecter, segmenter; transmettre et comprimer; classier et reconnaître; fusionner et interpréter. Cette énumération va dans le sens d'une interprétation croissante du contenu informationnel des signaux, en commençant par ce qu'il est traditionnel d'appeler le "bas niveau", encore proche du signal physique, pour aller vers le "haut niveau" plus proche de l'action-cible. Le traitement est généralement constitué d'un enchaînement de modules intermédiaires qui va du bas niveau vers le haut niveau. En fait, il existe une interaction entre les deux niveaux, des résultats insatisfaisants du traitement haut niveau pouvant exiger la reconfiguration du bas niveau ainsi que des capteurs.

Les travaux actuels français en TDSI vont dans la direction d'une modélisation *apriori* orientée par l'action-cible à laquelle est ordonnée le traitement (segmenter les phonèmes de la parole, réduire le débit de transmission, reconstruire le mouvement dans l'image...). Théorie et action renvoient donc Tune à l'autre, dans un équilibre dynamique. Ceci implique des contraintes sur les traitements, qui se répercutent dans les aspects informatiques architecturaux et logiciels. Le signal et l'image constituent donc un support important de problématiques pour le domaine de l'informatique (temps réel, modèles récurrents, programmation orientée objet, architectures parallèles, distribuées et connexionnistes).

## Traitements de haut niveau et interprétation de l'information

Les étages de traitement de haut niveau sont l'interface entre la chaîne de traitement et l'opérateur (ou l'organe) chargé du déclenchement de l'action-cible. A ce stade, il ne s'agit plus de préserver l'intégralité de l'information portée par le signal,

mais bien de trier les éléments qui aideront à l'interprétation et à la prise de décision finale. On a déjà mentionné l'aspect interactif entre haut niveau et bas niveau. C'est le cas d'un système qui, après la détection d'une première information de haut niveau, reconfigure l'étage bas niveau de façon adaptative pour privilégier la recherche d'une information complémentaire, afin de valider le diagnostic suggéré par la première information.

Ces systèmes d'interprétation de l'information sont une aide pour l'opérateur humain. Dans certains cas, ils peuvent le remplacer entièrement par des processus de raisonnements automatisés, ainsi qu'il a déjà été mentionné *supra* dans *L'informatique-partenaire*. Les résultats importants obtenus en reconnaissance automatique de la parole en sont un exemple bien connu (voir ci-après *Langages naturels et information*).

## Lignes prospectives

Schématiquement, l'évolution actuelle du traitement du signal consiste à sortir du cadre classique, *stationnaire, linéaire, gaussien, continu*. Ce cadre correspond à une bonne approximation de la réalité, au premier ordre. Mais il faut aller au-delà.

- C'est précisément par leurs *non stationnarités* que les signaux ont le plus de richesse informationnelle. Ceci est illustré par le signal de parole. En non stationnaire, les nouvelles approches sont les modèles de ruptures et de segmentation; les systèmes de poursuite adaptative; les modèles paramétriques évolutifs; enfin les représentations non paramétriques où l'analyse informationnelle du signal se fait à chaque fréquence ou à chaque échelle de résolution. Ici, en signal comme en image, mention spéciale est à faire de la récente *théorie des ondelettes*, aux aspects interdisciplinaires touchant aussi bien les mathématiques et la physique quantique que la mécanique, l'astronomie ou la chimie.

- Les approches *non linéaires* comprennent en particulier la génération et la caractérisation des signaux fractals ou chaotiques, qui sont des inter-



médiaires entre signaux déterministes et aléatoires; les filtres de Volterra que Ton retrouve en automatique; les filtres d'ordre que l'on exploite en image; l'approche connexionniste par réseaux de neurones formels particulièrement utile en reconnaissance de la parole. Ils permettent la modélisation de larges classes de traitements non linéaires et leur variation non stationnaire par adaptation.

- Les approches *non gaussiennes* peuvent être basées sur la généralisation des fonctions de corrélation à des ordres supérieurs à deux. Ceci permet la construction d'une grande variété de modèles statistiques qui peuvent décrire correctement beaucoup de signaux ou d'images réels. Les chaînes de Markov et les champs de Markov constituent une autre approche d'avenir non gaussienne, utile pour la représentation de la parole et des images.

- Les approches *discontinues* sont diverses. Elles vont des modèles de géométrie discrète et de morphologie mathématique pour la reconnaissance des formes, aux processus aléatoires ponctuels rencontrés en communication optique à très faible niveau, en passant par les systèmes à événements discrets qui modélisent les files d'attente et les réseaux informatiques.

Mentionnons encore les modèles bayésiens de la théorie de l'information, où par maximisation itérative d'entropie on peut optimiser les traitements et leurs paramètres; les modèles de surfaces et de volumes pour la reconstruction à trois dimensions spécialement appliqués dans le domaine biomédical (tomographie); les modèles interprétatifs et dynamiques pour l'analyse et le suivi d'images animées; les questions théoriques encore mal formulées dans le domaine de la fusion d'informations, qu'elle soit amont (fusion multi-capteurs) ou aval (coopération de traitements).

On voit s'ouvrir aussi de nouvelles voies de traitement de haut niveau pour la perception artificielle et l'interprétation automatique, applicables tant en robotique intelligente (voir ci-après *Robotique - Vision artificielle*) qu'en détection radar ou sonar, où l'on cherche une identification automa-

tique de cibles *a priori* non coopératives. Schématiquement, on peut distinguer trois types d'approches méthodologiques de ce problème :

- *l'inversion d'un modèle générateur*, connu *a priori*, qui lie une cause originelle à son expression finale sous la forme du signal observé. C'est la démarche la plus algorithmique, elle est bien adaptée à des signaux exprimés sous forme numérique. Mais elle se heurte souvent à l'absence de solution unique (le "problème mal posé"). Il faut alors faire intervenir une régularisation qui force l'une des solutions possibles, sur la base de critères prédéterminés. Cette approche est utilisée pour la reconnaissance de la parole ainsi que pour la reconstruction d'images;

- *l'apprentissage préalable*, à partir d'informations préalablement mesurées et interprétées. S'agissant par exemple d'un problème de reconnaissance de formes, le traitement consistera à reconnaître les formes inconnues par l'évaluation d'une distance avec les formes apprises. L'approche connexionniste dans ce domaine conduit à des résultats spectaculaires. Mais elle pose d'importants problèmes théoriques (optimisation de l'architecture du réseau, choix des prétraitements, lenteur de l'apprentissage...). De plus, elle n'est pas encore abordée dans le domaine plus complexe des objets tridimensionnels;

- la mise en oeuvre de processus cognitifs et de raisonnements automatisés s'inspirant directement du schéma de raisonnement conscient ou intuitif de l'opérateur humain, dans une optique de *système expert à base de connaissances*. Cette démarche s'intègre moins bien dans la continuité de la chaîne de traitement du signal car elle nécessite d'y intercaler des étages interprètes, traduisant les informations numériques sous forme de symboles manipulables par les systèmes experts. En revanche, elle est bien adaptée aux informations qualitatives, voire incertaines ou incomplètes. En permettant d'associer des informations de nature hétérogène, elle donne également des pistes dans les problèmes de fusion cités plus haut.



Adaptées à des situations différentes, les trois dernières approches apparaissent bien plus complémentaires qu'antagonistes, d'autant qu'une tendance récente est de les combiner entre elles, comme mentionné *supra* dans *L'informatique-partenaire*. Mais les deux dernières représenteront sans doute les voies les plus novatrices de la prochaine période, en relation avec le développement général des sciences cognitives.

Pour toutes ces approches, l'étape ultime est la validation par une évaluation de performances. Elle est subjective, à cause de la variété considérable des mesures (même pour un seul type d'application) et met en évidence la nécessité de traitements robustes et/ou adaptatifs. C'est une caractéristique de l'école française actuelle que de tenter d'introduire dans cette étape un maximum d'objectivité, par l'élaboration de bases de signaux et d'images tests - réels ou synthétiques - validées par des experts de l'application considérée. Cela permet une comparaison et un classement des traitements et algorithmes.

### 3 - ROBOTIQUE - VISION ARTIFICIELLE

#### La robotique

La robotique traite de la construction de *systèmes intégrés* conçus pour réaliser un ensemble de tâches matérielles pré-définies dans un environnement physique partiellement perçu et modélisé. Dans ce but, le système est doté de facultés de perception, par l'intégration de capteurs qui peuvent être de nature diverse (physique, chimique, biochimique). L'évolution des thèmes de recherche fait apparaître trois tendances ;

- le *robot mobile* fait l'objet d'un intérêt croissant (préalable à des applications commerciales) comparé au thème des robots manipulateurs. Ce dernier, prépondérant il y a quelques années, entre dans une phase de consolidation, même s'il reste des axes de recherche importants tels que

systèmes redondants, robots parallèles et robots souples;

- la robotique s'ouvre au *non manufacturier* par des recherches privilégiant les environnements peu ou pas structurés et mal connus *apriori*]

- le concept de téléopération tend à évoluer selon deux axes : la *téléprogrammation* où l'esclave mécanique qu'était le robot devient exécutant partiellement autonome du programme de tâches demandé par l'opérateur; le "*copilotage*" *intelligent* pour la surveillance et le diagnostic, qui apporte ses résultats de façon synthétique à l'opérateur humain, lequel reste maître du choix des actions.

Cette triple évolution traduit la progression du concept de *robot intelligent* de troisième génération, dont un exemple est le véhicule autonome pour l'exploration planétaire. Ce robot est apte à raisonner et à gérer les relations entre tâches et actions, c'est-à-dire à percevoir l'environnement, à modéliser et à raisonner son interaction avec lui, à planifier des procédures d'action et de contrôle pour exécuter des tâches décrites de façon synthétique et naturelle par un opérateur humain. Dans ce cadre, l'informatique se décline de façon originale impliquant :

- le contrôle en temps réel avec contraintes temporelles pour la perception, la modélisation, la planification, le raisonnement et la prise de décision;

- la prise en compte de l'incertitude liée à la mesure et au traitement des signaux perçus en environnement réel bruité;

- lors du raisonnement, de la planification et de l'exécution, la prise en compte de la différence entre la réalité physique et les modèles du monde et de l'action.

Le robot intelligent a donc une approche déductionniste (ou systémique), où sont explicités un ensemble de connaissances et de représentations déterminée. Ainsi des résultats marquants ont été

acquis dans des domaines aussi variés que la fusion multi-capteurs, le raisonnement géométrique, les systèmes décisionnels en temps réel, l'utilisation de réseaux de neurones pour le contrôle.

Il existe une autre approche dite *comportementalisée* qui s'appuie sur le constat que des systèmes formés d'acteurs à réactivité individuelle réduite peuvent avoir un comportement global complexe, où semble émerger une intelligence collective. La confrontation entre les approches "robot intelligent" et "société de robots" peut faire l'objet d'un débat fructueux.

Parmi les autres sujets très peu abordés en France, il faut citer les robots "marcheurs" (ou robots à pattes), la saisie dextre, et les micro-robots dont l'architecture est intégrée et miniaturisée à l'extrême. Il est souhaitable d'assurer un niveau de recherche significatif à ces sujets dans les années qui viennent, car ils ouvrent de nouveaux champs applicatifs (par exemple en médecine) et posent des problèmes théoriques nouveaux d'environnements.

## La vision artificielle

C'est un champ scientifique pluridisciplinaire. Elle concerne l'acquisition d'informations géométriques et topologiques d'images planes ou volumiques en mode statique ou dynamique. Le plus souvent, le capteur choisi est la caméra CCD, en référence à des applications de robots mobiles terrestres. Le but est la compréhension et l'interprétation automatique de scènes. Mais on s'intéresse plus aux environnements structurés, souvent artificiels, vu la complexité des descripteurs de scènes naturelles.

En statique, vision monoculaire multi-focale (zoom) et vision stéréoscopique binoculaire ou trinoculaire permettent de percevoir la profondeur. La vision dynamique s'intéresse à la perception du mouvement, grâce à une caméra mobile qui utilise directement le flot visuel ou les images successives comme des données quasi-stéréoscopiques.

Une problématique qui émerge avec force est le concept de fusion multisensorielle dont la stéréovision est un premier type. Plus largement, on peut fusionner une information monoscopique avec des mesures éparses de télémétrie, fusionner une séquence d'images, ou encore fusionner les informations de distance et de luminance d'un télémètre imageur. Le problème central est la prise en compte et la modélisation des incertitudes.

Dans les environnements structurés (en général artificiels), la stéréovision s'opère par mise en correspondance de segments significatifs extraits des multiplets d'images. Dans les milieux non structurés, les recherches sont moins avancées. Elles se bornent à comprimer les images, tout en réduisant le volume de calcul : recherche de primitives pertinentes, d'invariants, traitements multi-échelle. Mais il faudrait poursuivre l'effort de recherche bien au-delà. Apparaît alors la problématique de la perception qui suppose une intelligence pour interpréter et représenter les données issues du niveau sensoriel, à partir de modèles de connaissance et de règles fournies au système.

La recherche en vision artificielle est animée par le Pôle Vision du GDR CHM et par la partie "reconstruction 3D" du GDR TDSI.

## TRAITEMENT DE GRANDES MASSES DE DONNÉES

L'objet de ce chapitre n'est pas de faire un long inventaire descriptif des applications des sciences de l'information. Mais, à partir de quatre exemples typiques, nous voulons illustrer les énormes besoins de traitement de données qui se posent dans les sciences autres que celles de l'information. Chaque exemple représente un enjeu scientifique et économique considérable dans son propre domaine. Mais, en même temps, chacun constitue un questionnement et une mine de pro-

blématiques nouvelles pour les sciences mêmes de l'information. Ces exemples ont comme préoccupations communes la représentation des connaissances et la modélisation d'une information structurellement et sémantiquement riche. Ils font comprendre l'impérieuse nécessité d'une démarche scientifique multi et inter-disciplinaire conforme à la politique actuelle du CNRS.

## 1 - LES SYSTEMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUES (SIG)

Les SIG modélisent l'information géographique, sous son double aspect d'objets géométriques et d'attributs s'y référant, de façon à pouvoir la gérer, la traiter et la représenter par carte ou image. Ces systèmes ont déjà de nombreuses applications dans des domaines tels que la gestion de données environnementales, l'aide à la décision d'aménagement (par exemple études d'impact antérieures aux grands travaux), la gestion de la propriété et de l'utilisation du sol, les inventaires nationaux de grande ampleur comme les recensements, etc. D'une manière générale, les SIG sont d'importance considérable pour les problèmes d'environnement. Leurs enjeux interviennent en matière :

- économique : marché du logiciel, du savoir-faire, des données avec, entre autres, des retombées pour le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et l'Institut Géographique National (IGN);

- militaire : que Ton songe au rôle des SIG dans la guerre du Golfe;

- de gestion territoriale : ce sont des instruments indispensables aux collectivités territoriales, aux Ministères Techniques, aux grandes entreprises publiques;

- de gestion de la mobilité des biens et des hommes.

Les SIG actuels gèrent correctement l'informa-

tion cartographique, mais se révèlent insuffisants sur nombre de points, parmi lesquels :

- la modélisation à quatre dimensions (espace + temps);

- la gestion des objets réels complexes ou hétérogènes;

- la connexion avec l'analyse spatiale (interpolation, généralisation, échantillonnage, zonation) et avec la modélisation spatiale.

Les sections 01 (Mathématiques), 07 (Sciences et technologies de l'information) et 37 (Economie et société) du CNRS viennent de créer un GDR pluridisciplinaire sur l'information géographique et l'analyse spatiale. D'autres organismes tels le CNES, l'IGN, France Télécom, ainsi que des Ministères techniques sont prêts à participer à une action de recherche d'envergure, comme l'avait annoncée Hubert Curien, en conclusion du grand colloque de prospective sur la géographie, tenu au Ministère de la recherche et de la technologie en décembre 1990. Cet effort pourrait consister à renforcer les centres de traitement qui se sont récemment mis en place à Paris, Montpellier, Grenoble, Rouen et Strasbourg, Sur un marché de l'information géographique qui progresse très vite, la place de la France serait alors satisfaisante grâce aux données spécialisées (CNES, IGN) et aux laboratoires prestataires de savoir-faire spatial (agronomes, géographes,...).

## 2 - ARCHIVAGE ET TRAITEMENT DES DONNÉES EN ASTRONOMIE

L'acquisition et l'archivage à long terme d'un énorme afflux de données pose un défi à l'astronomie. Les données proviennent des détecteurs modernes qui accompagnent les missions spatiales, ou des relevés systématiques du ciel accomplis depuis le sol, ou simplement des observations pointées des grands télescopes (CFHT à Hawaï, et bientôt *Very Large Telescope*, VLT, au Chili). Le rapport de prospective pour l'Astronomie de l'Institut National des



Sciences de l'Univers (INSU) du CNRS (janvier 1992) montre que la discipline relève ce défi.

L'apport aux progrès de la connaissance que constituent les grands instruments, dans l'espace ou au sol, ne se limite pas en effet à l'exploitation immédiate des observations. Les données elles-mêmes forment, en se complétant dans leur ensemble, un potentiel de découvertes qui parfois ne sera réalisé que des décennies plus tard. Ainsi les données qui avaient été acquises dans la direction de la supernova SN 1987a avant son explosion ont pris soudainement une grande importance. Le défi est posé par l'accroissement du volume et du rythme d'acquisition des données, une plus grande complexité des niveaux d'organisation des données et des moyens de traitement à mettre en œuvre pour leur interprétation (exemple du traitement des images fournies par le Télescope Hubble); et enfin le besoin accru de disposer rapidement des résultats acquis dans d'autres domaines.

Pour résoudre ces problèmes, un effort particulier est entrepris par la communauté française des sciences de l'univers pour :

- l'archivage des données : ceci implique des collaborations au niveau européen et des contributions transversales de spécialistes du traitement de l'information;

- la distribution des données par le développement des réseaux et bases de données et par l'homogénéisation des protocoles et des approches, par exemple dans le domaine des formats;

- l'analyse des données. Ceci fait souvent appel à des avancées pluri-disciplinaires. On peut citer par exemple l'opération "Synthèse d'ouverture" pour la reconstruction de la carte du ciel que fourniront les données issues du VLT (collaboration avec le GDR TDSI) ainsi que le développement associé de l'optique adaptative.

L'importance de l'effort consenti est illustré par l'existence de deux centres spécialement dédiés au traitement et à l'archivage des données :

- le Centre d'Analyse des Images de l'INSU avec, par exemple, le programme MACHOS de détection des microlentilles gravitationnelles;

- le Centre de Données astronomiques de Strasbourg pour l'archivage et la distribution des données astronomiques.

### 3 - GÉNOMES ET INFORMATION

Durant ce siècle, l'homme a élaboré une théorie du calcul, réalisé des ordinateurs et des robots, découvert le code génétique et initialisé le génie génétique. S'il est maintenant systématique d'établir la séquence d'un génome, il reste difficile de l'interpréter. Et il faut souligner le volume de ces données : le génome d'une bactérie comme *E. coli* est un "texte" de cinq millions de "caractères", celui d'un homme en comporte trois milliards.

Comment ces masses d'informations "fontelles du sens"? Les biologistes accumulent les connaissances, mais on pense que les mécanismes profonds, les structures sous-jacentes, restent pour l'essentiel à découvrir.

La théorie du calcul et sa pratique intensive par ordinateur peuvent aider à comprendre la machinerie biochimique universelle, qui construit et maintient tout être vivant à partir des informations contenues dans son génome. Par exemple, elles peuvent aider à saisir comment une séquence nucléotidique peut être simultanément, alternativement ou exclusivement, donnée, ou programme, objet ou sujet d'un calcul. A ce niveau de modélisation discrète, des hiérarchies de structures syntaxiques sont à découvrir et des règles grammaticales à inférer (la moitié des données obtenues par séquençage systématique ne ressemblent à rien de connu), mettant en œuvre mathématiques discrètes, probabilités, statistiques et analyse de données, et divers aspects de l'informatique théorique (langages, réécriture, théorie de la complexité, compression). Il en est de même pour la classification



des structures secondaires des ARN ou des protéines par systèmes algébriques ou combinatoires. (L'exemple de la linguistique, des langues naturelles et des langages artificiels, aide à saisir les apports et les limites respectives attendus de l'approche syntaxique et de l'approche "subsymbolique"). La dynamique des systèmes complexes, les réseaux cellulaires ou connexionistes, pourront aider à modéliser les relations entre les structures et les fonctions des macromolécules, la régulation de l'expression des gènes par interaction avec l'environnement, voire à éclairer les problématiques de l'évolution.

Connaissances et représentations sont indissociables; la représentation des connaissances en génétique est tributaire des concepts du moment, mais elle aide en retour à la découverte. La modélisation des connaissances en termes d'objets et de relation entre objets aide au raisonnement taxinomique, à l'explicitation des points de vue, à l'évolution de modèles, à l'émergence interactive d'objets sensés que l'on découvre ou invente; par là, elle aide à la reconstruction phylogénétique, à la structuration de la connaissance sur des organismes entiers, à l'étude du polymorphisme, à la localisation de gènes défectueux,

D'une façon plus technique, l'établissement de cartes génétiques et physiques nécessite une automatisation qui accélère et fiabilise l'acquisition des séquences. La lecture de longs gels ou la localisation de sondes sur les chromosomes peuvent être améliorées par des méthodes de traitement d'image et du signal. Le traitement de longues et nombreuses structures primaires nécessite des algorithmes de comparaison et de classification performants en moyenne, pouvant exploiter le parallélisme ou de nouvelles heuristiques. Les bases de connaissances et les environnements logiciels qui permettront au généticien de manipuler virtuellement ses objets seront donc à la fois des outils pour le généticien et des champs d'expérimentation et de validation pour l'informaticien.

Bref, la confrontation du traitement de l'information génétique par le vivant à celui de l'information par l'ordinateur ouvre de nouvelles voies de re-

cherches. La génétique pose des problèmes d'élucidation de structures discrètes comme de représentation-construction de connaissances incertaines. Enfin, et ceci est capital, le génie génétique permet la validation des hypothèses et modélisations par le retour à l'expérience. Le GDR interdisciplinaire "Informatique et génomes", qui associe depuis 1992 des généticiens et des informaticiens, doit aider à explorer ces pistes.

## 4 - LANGAGES NATURELS ET INFORMATION

Dans le traitement de l'information, le langage naturel est à la fois intermédiaire obligé pour de nombreuses applications et objet de recherche propre.

La première situation apparaît lorsque le langage écrit ou parlé joue le rôle de support de communication entre l'homme et la machine. À ce titre les sciences du langage sont en relation étroite avec l'informatique, laquelle devient un partenaire (voir *supra* : *l'informatique-partenaire*),

Dans la deuxième situation, la compréhension et la formalisation des processus langagiers humain constituent l'objet privilégié des recherches : linguistique formelle, signification référence, ambiguïté, paraphrase...

En effet, le fonctionnement satisfaisant de systèmes à finalité restreinte, comme les générateurs d'annonces vocales et les traducteurs automatiques dans des domaines clos, ne saurait masquer la complexité des processus mis en jeu dans la génération ou la compréhension naturelle d'énoncés ouverts. C'est ce que rappelle le repli de la traduction entièrement automatique vers la traduction assistée par ordinateur (TAO) ou sa limitation à des domaines spécialisés. Le développement des théories linguistiques et cognitives doit donc être poursuivi, avant toute simulation à grande échelle, notamment la

modélisation des interactions entre les niveaux reconnus d'analyse linguistique : phonétique, morphologique, syntaxique, sémantique, sémiologique, lexicologique, pragmatique, stylistique, ...

Cette double situation explique la diversité des traitements automatisés de données langagières entre les applications répondant à un besoin technique ou commercial ponctuel (par exemple les correcteurs d'orthographe) et les essais de modélisation fine d'une partie du fonctionnement langagier. Dans tous les cas, on peut noter que la réussite d'une simulation (surtout partielle) n'implique pas qu'elle ait un pouvoir explicatif élevé.

Cependant, la tendance actuelle est au rapprochement des deux situations. Elle devrait être renforcée par des cursus universitaires pluridisciplinaires et par la coopération de points de vue différents issus des sciences pour l'ingénieur et des sciences du langage.

Même s'il ne s'agit pas de systèmes généralistes ouverts, les différents niveaux de l'analyse linguistique ont déjà fait l'objet de traitements automatisés : le traitement automatique de la parole, la transcription phonétique, phonologique ou orthographique et la génération de la parole à partir du texte, l'analyse de textes écrits (imprimés ou manuscrits), l'extraction d'informations d'un texte (indexation automatisée, résumé automatique, même à partir d'un texte intégral), la traduction automatisée ou assistée par ordinateur, les systèmes de dialogue homme-machine.

La compréhension effective d'un texte (avec ses présupposés et son orientation argumentative) est plus souvent circonvenue habilement que résolue, ce qui laisse ouvert le vaste domaine de la formalisation des contenus discursifs, y compris dans les situations de communication implicite,

La recherche sur les langages naturels est encouragée par les deux, ministères - de l'Education nationale et de la Recherche -, grâce à trois programmes collectifs : les deux GDR-PRC "Communication homme-machine" (pôle "Communication

parlée<sup>11</sup>) et "Intelligence artificielle", et le PRC "Informatique et linguistique".

Les équipes de recherche ont des situations très diverses. En *traitement de la parole*, elles relèvent soit du CNRS (principalement le département SPI et, dans une moindre mesure, le département Sciences de l'homme et de la société), soit de France-Télécom, soit de l'INRIA. Très tôt, le domaine a été structuré de manière décisive par le GRECO "Communication parlée". Bien que l'on voit naître des couplages entre recherches des deux types, le *traitement de l'écrit* présente une organisation et un niveau de coopération bien moindre. Il existe beaucoup de petites équipes universitaires, et le pourcentage de représentation du CNRS y est beaucoup plus faible que dans le traitement de l'oral. Au sein des chercheurs en sciences du langage, le problème essentiel demeure le manque de projets fédérateurs préservant la diversité des approches. Il convient de ne pas renouveler l'expérience de certains gros financements ponctuels qui n'ont pas joué ce rôle (programme TAO, pôle Firtech, Eurotra,...) et de structurer une diversité de théories, de modèles et de méthodes qui représente une très grande richesse.

## INFORMATION ET SOCIÉTÉ

On assiste actuellement à une diffusion très rapide au sein de la société, des technologies de l'information (TI) basées sur l'informatique. La vision d'un monde où ces technologies seraient automatiquement l'outil d'une productivité et de performances accrues pour les organisations et les hommes qui les utilisent, cède aujourd'hui le pas devant une réalité complexe, où le "toujours plus" en matière d'informations - même soumises au traitement informatique - conduit souvent à une perte de pertinence.

Ces dernières années est apparu le souci de mieux comprendre le rôle du contexte social et hu-

main dans la mise en œuvre et la conception des TI, mais aussi dans la genèse des innovations. Grâce au programme STS (Science, technique, société), puis au PIRTIEM (Programme interdisciplinaire de recherche sur technologie, travail, emploi et mode de vie), le CNRS a stimulé un certain nombre de recherches à l'interface des TI et d'autres disciplines susceptibles par tradition de traiter ces questions comme objet de recherche ; l'histoire des techniques, la sociologie, la psychologie, l'économie, les sciences de la gestion, l'ergonomie cognitive.

En particulier, on notera les recherches sur l'histoire de l'informatique, sur les conditions de développement des pôles d'enseignement et de recherche en informatique en France, sur les enjeux qui se nouent autour du thème de la "société de l'information", sur les facteurs humains de la sécurité informatique ainsi que sur le système de valeur professionnel des informaticiens, sur l'insertion des TI dans les organisations, ou sur la conception des systèmes techniques incluant l'homme dans la boucle de décision (modèles et procédures de l'aide à la décision et de la recherche opérationnelle : AD-RO). Ces recherches devraient pouvoir être soutenues et mieux coordonnées. Sont mentionnés ici plus particulièrement, à titre d'exemple, les travaux sur l'implantation et l'impact des TI dans les entreprises ainsi que la diffusion de l'informatique scientifique et technique.

## 1 - L'INFORMATION DANS LES ORGANISATIONS

### L'information dans l'entreprise

Il y a actuellement un contraste frappant entre, d'une part, le perfectionnement incessant des outils informatiques disponibles, et d'autre part, l'insuffisance des méthodologies pour exploiter les informations pertinentes à partir d'un problème posé à un responsable d'une entreprise. On est donc amené à se poser les questions suivantes ;

- quelles sont ou quelles devraient être les sources et les informations utiles pour les entreprises, en provenance de l'extérieur de celles-ci ?

- quels sont les comportements des entreprises en matière de "consommation" d'informations d'origine externe ? Comment expliquer ces comportements ?

- quels sont les facteurs de succès et les facteurs de blocage des entreprises en général, et des PME-PMI en particulier, à l'égard de l'utilisation des informations extérieures à des fins de performance économique ?

Les connaissances dans ce domaine sont très faibles. Sur le marché, l'offre d'informations est très supérieure à la demande des entreprises. Pour expliquer cette situation et évaluer si elle est préjudiciable, il serait intéressant de pouvoir comparer avec les entreprises étrangères : seraient-elles davantage ouvertes à l'utilisation d'information concernant leur environnement économique ? Si oui, comment expliquer cette différence ? Une meilleure formation aux concepts et techniques de traitement de l'information contribuerait-elle à mieux tirer parti des informations élaborées et stockées lors de la préparation des décisions ?

### Information et pouvoir dans les organisations

Dans les organisations, la notion d'information a un sens très général : c'est tout ce qui permet d'atteindre ses objectifs ou d'anticiper des situations futures. Le contrôle de l'information constitue donc un enjeu social important. : le fait d'être mieux informé que ses collègues ou avant eux donne du pouvoir et permet d'améliorer sa position.

Les TI mettent à jour le fonctionnement des organisations. Elles poussent à l'objectivisation des règles qui régissent le comportement des individus. Elles rendent officiel ce qui ne l'était pas, et portent sur la place publique des arrangements établis entre



les membres de l'organisation, souvent de manière opaque ou non officielle, mais avantageuse pour eux. En ce sens, les TI bouleversent le fonctionnement des organisations, car elles modifient l'équilibre des pouvoirs ainsi que les processus de décision. De la maîtrise de ces modifications dépend la réussite de l'informatisation des processus de travail.

Il existe de nombreux travaux sur des outils d'aide à la décision susceptibles d'être implantés au sein des entreprises. Mais il serait opportun de développer plus de recherches sur le fonctionnement des organisations en général et des entreprises en particulier, sur les sources de leur efficacité et de leur efficacité, pour que les TI soient mieux articulées avec les réalités organisationnelles.

## 2 - IMPLANTATION DES TI DANS LES ORGANISATIONS

### Recherche des facteurs de succès

Un constat surprenant semble s'imposer : le succès que connaît l'informatique au sein des entreprises n'est pas un objet d'unanimité. Il n'est pas aussi total que les dirigeants l'avaient escompté, même s'il n'est pas question d'une remise en cause. Ce constat montre qu'il reste encore beaucoup à faire pour bien comprendre les facteurs déterminants du succès (ou de l'échec) dans l'utilisation des TI au sein des organisations. Ce succès est fortement lié à l'interdépendance "hommes-technologies-caractéristiques organisationnelles". Le comportement des hommes joue un rôle essentiel. Des recherches sont engagées à la fois sur le degré de succès de l'implantation de telle ou telle technique (micro-ordinateurs, modèles et algorithmes de l'AD-RO, systèmes experts pour le management, ...) et sur le comportement des responsables en matière d'investissements dans les TI. Mais ce champ de recherche demeure encore trop peu exploré.

### Performances des organisations et compétitivité des entreprises

Il est utile de chercher à mettre en évidence les avantages concurrentiels que peut tirer une entreprise investissant dans les TI. Deux approches principales sont utilisées : une approche "interne" et une approche "externe".

Dans *l'approche interne*, les recherches visent à apprécier l'influence de l'utilisation des TI, soit sur l'efficacité de l'organisation, soit sur l'efficacité de celle-ci. Une première difficulté est de préciser ces concepts, une deuxième de les rendre opérationnels pour permettre des mesures. Les quelques recherches actuelles dans cette direction portent sur l'évaluation du rapport performances économiques/coûts de l'informatique dans l'entreprise, ainsi que sur l'impact des TI pour la productivité de travail des cadres. Les travaux théoriques, prolongés par des validations empiriques, doivent être renforcés dans cette perspective. Ceci répondrait à une réelle demande de la part d'organismes, tant publics que privés.

Dans *l'approche externe*, il s'agit d'évaluer l'impact de l'utilisation des TI sur certaines dimensions de la compétitivité des entreprises, telles que le pouvoir de négociation de l'organisation vis-à-vis de ses clients ou de ses fournisseurs, et les barrières à l'entrée sur le marché, face à de nouveaux concurrents potentiels. Ici, les recherches sont plutôt conduites en partant d'observations réalisées à partir de cas, pour en inférer et conceptualiser des hypothèses. Après validation avec des méthodologies appropriées, ces hypothèses seraient utiles pour guider l'action des décideurs devant faire des choix d'investissements informatiques.

### Veille technologique

Toutes les organisations sont aujourd'hui utilisatrices des TI. Cependant certaines d'entre elles y voient une source possible d'avantages concurrentiels plutôt qu'un phénomène incontournable. Elles



se placent alors dans une attitude d'écoute prospective des évolutions, afin d'être les premières à utiliser de nouvelles technologies pertinentes. C'est ainsi la question de la veille technologique qui est posée dans le domaine particulier des TI. Afin de comprendre les facteurs de succès (mais aussi d'échec ou de stagnation) de cette fonction au sein des organisations, quelques études ont été entreprises, mais il reste énormément de travail à faire. En particulier il serait intéressant de connaître la position de la France par rapport à l'Allemagne et aux pays européens dans ce domaine.

## Formation des personnes

Dans la perspective de la diffusion des TI dans les organisations s'introduit un double enjeu :

- d'une part, il faut connaître et gérer les interactions entre systèmes humains et systèmes artificiels, pour que la conception de ces derniers assure efficacité et fiabilité lors de la mise en œuvre;

- d'autre part, qu'elles soient outils, partenaires ou acteurs autonomes, les TI exigent une formation appropriée des hommes et des femmes qui les conçoivent et de ceux qui les utilisent. Les coopérations de l'ergonomie cognitive et de la didactique, avec les disciplines concernées du SPI, doivent donc être développées, tant sur "l'amont" de la conception, que sur "l'aval" de l'utilisation des TI.

La question de la formation se pose à plusieurs égards :

- quelle formation donner aux hommes afin que, une fois en situation professionnelle dans une organisation, ils veuillent et sachent utiliser au mieux les TI mises à leur disposition ?

- quelle formation donner aux spécialistes des TI afin qu'ils ne soient pas définitivement cantonnés dans certains postes sans possibilité d'évolution vers d'autres responsabilités plus larges ? La question se pose de plus en plus au sein des entreprises, surtout pour les postes élevés,

## 3 - ACCÈS À L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE : LES RISQUES D'UN PROGRES DE PLUS EN PLUS MAL PARTAGÉ

Depuis les bases de données et la télématique, la diffusion de l'information scientifique et technique (IST) est considérée comme un domaine particulièrement bénéficiaire des avancées dans les sciences et technologies de l'information. La réalité peut différer notablement de cette image idyllique. La mise en œuvre de moyens informatisés en IST va souvent de pair avec le développement d'une approche strictement marchande de l'information. Il en résulte paradoxalement de sérieuses limitations, tant dans l'accès à l'information que dans l'utilisation de technologies performantes.

Dans certains cas, les tarifs d'une base de données bibliographique peuvent avoir pour effet l'exclusion de la majeure partie de ses utilisateurs potentiels. Comme les coûts engendrés par l'interrogation d'une base de données sont une proportion infime des coûts de constitution de la base, cette sous-utilisation d'un outil existant n'est même pas génératrice d'économies. L'accès à des documents, une fois qu'ils ont été identifiés, peut être entravé de la même manière. De plus, dans un pays comme la France, le réseau de bibliothèques de service public est insuffisamment développé. On doit s'interroger sur ce type de dérive et sur son illustration au sein même du CNRS avec la gestion par l'INIST de ses deux grandes bases de données bibliographiques PASCAL et FRANCIS. Le CNRS pourrait pallier en partie cette dérive par une affectation de crédits auprès des bases de données qu'il gère, par analogie avec les heures de calcul dans les grands centres.

Sur le plan technique l'écart entre la recherche en informatique et la gestion des bases de données réellement existantes s'accroît pour des raisons institutionnelles et/ou commerciales. Les systèmes d'interrogation sont éloignés de l'état de l'art. Ne doit-on pas s'étonner que les grandes bases de

données bibliographiques du CNRS ne soient pas un lieu privilégié de mise en œuvre ou de mise à l'épreuve en vraie grandeur des systèmes évolués d'interrogation développés dans les équipes de recherche du CNRS ? Mais le CNRS a abandonné à une entreprise à finalité commerciale le monopole de l'interrogation en ligne des bases de données qu'il produit, Cette situation n'est guère favorable à une synergie entre recherche et développement.

## QUELQUES RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES

### 1 - POLITIQUE NATIONALE

#### Structures fédératives

Les GDR du CNRS mentionnés dans ce chapitre ont un rôle irremplaçable pour structurer la communauté et ses actions de recherche. La communauté y est très attachée. Sous l'égide du MRE, les PRC ont permis le déploiement des actions des GDR dans le domaine de l'informatique et de l'intelligence artificielle.

Il est clair que ces deux types d'action doivent être poursuivis et même étendus.

#### Concertation entre organismes

La communauté scientifique dans les domaines informatique, automatique, traitement du signal a la particularité de voir sa population de chercheurs également partagée entre le CNRS et l'INRIA (300 chercheurs chacun) et sa population universitaire dix fois plus nombreuse que les CNRS

(3000 enseignants-chercheurs, dont beaucoup ont été fraîchement recrutés). Ces chiffres illustrent la nécessité d'une étroite concertation entre le CNRS, la Direction de la Recherche et des Etudes Doctorales (DRED) du MEN et l'INRIA. La concertation doit concerner aussi bien la politique scientifique et les opérations de recherche, que l'harmonisation de la politique des personnels, par exemple l'alignement des carrières au CNRS sur celles à l'INRIA. Cette concertation est entrée dans les faits entre le CNRS et la DRED. Elle s'amorce entre le CNRS et l'INRIA.

### 2 - POLITIQUE EUROPÉENNE

Les recherches acquièrent un aspect de plus en plus international, simplement parce qu'une part importante des budgets contractuels proviennent de la Communauté Européenne. Il ne faut pas sous-estimer le fait que la Communauté détient ainsi une partie de la conduite de la politique scientifique nationale. Le CNRS doit donc encourager beaucoup la participation de ses chercheurs aux instances et groupes d'experts qui élaborent les programmes communautaires.

Le tarissement possible dans les années futures des sources de financement communautaires risque de mettre en difficulté les laboratoires de recherche qui ont le plus activement participé aux programmes européens,

### 3 - RECRUTEMENT DE CHERCHEURS

*En informatique*, les recrutements de chercheurs ont augmenté ces dernières années, mais le CNRS intervient encore faiblement dans l'ensemble du dispositif de la recherche publique française : cet effort de recrutement ne doit absolument pas fléchir pendant plusieurs années. Il faut en particulier s'assurer que tous les thèmes de recherche importants au niveau international sont couverts par la France.

*En automatique et en traitement du signal*, la situation est préoccupante car les possibilités de recrutement de jeunes chercheurs restent encore d'un niveau très insuffisant. La quasi-totalité des jeunes les plus brillants se trouve alors aspirée par l'industrie aussitôt après leur thèse, au moment de leur plus forte productivité en recherche. C'est là un grave appauvrissement.

*Dans toutes les disciplines*, il est quasiment impossible de faire entrer au CNRS des chercheurs de haut niveau formés dans l'industrie, Cela encore est un appauvrissement.

#### 4 - EQUIPEMENT DES LABORATOIRES

Des investissements importants ont été faits depuis plusieurs années pour équiper informatiquement les laboratoires ; la norme vers laquelle il faut tendre, et dont quelques laboratoires se rapprochent, correspond à une station de travail par chercheur, ces stations étant interconnectées au travers de réseaux qui comportent eux-mêmes des serveurs de logiciels, de fichiers et de calcul, ainsi que des imprimantes et autres dispositifs spécialisés. La mise en place de tels réseaux représente des investissements considérables qu'il faut aujourd'hui entretenir (frais de maintenance de plus en plus lourds, mais aussi remplacement de stations déjà anciennes, câblages, etc.). Par le biais des "moyens mi-lourds", le CNRS a contribué à cet effort, les PRC

et GDR également. Mais, pour beaucoup de laboratoires, une large part des crédits utilisés pour cela viennent de leur participation à des programmes européens comme ESPRIT, qui ont maintenant tendance à ne plus être aussi généreux. Il faut donc veiller à ne pas ralentir cet effort, tant au niveau du CNRS qu'au travers des PRC et GDR.

#### 5 - INGÉNIEURS ET TECHNICIENS

La taille et la complexité des réseaux de stations de travail installés dans les laboratoires exigent la présence permanente d'ingénieurs et de techniciens qui font actuellement gravement défaut. Trop de laboratoires sont extrêmement démunis de cette catégorie de personnel et doivent soit utiliser une part de leurs crédits pour rémunérer des personnels contractuels, soit, bien souvent, faire appel à la bonne volonté de chercheurs ou de thésards dont ce n'est pas la mission normale,

**Odile Macchi**

*Présidente du groupe 02*

*avec la collaboration de*

*Jacques Bemussou*

*Philippe Breton*

*Philippe Jorrond*



# 03

## SCIENCES DE LA COGNITION ET DE LA COMMUNICATION

### INTRODUCTION : UNE INTERDISCIPLINARITÉ EN EXPANSION

Les années quatre-vingts ont vu le fort développement et l'émergence institutionnelle en France d'un domaine ouvert à une large interdisciplinarité : celui des *sciences de la cognition*, c'est-à-dire l'étude des processus par lesquels se réalise et s'exprime la *connaissance* sur une variété de supports et de dispositifs, naturels ou artificiels. Dans ce domaine, l'interdisciplinarité et le partage de concepts sont mis en œuvre avec pour perspective d'élaborer une représentation scientifique des structures et processus de connaissance qui ne soit plus tributaire d'une seule approche. Plutôt qu'un objectif en soi, l'interdisciplinarité est vue ici comme un instrument de progrès cognitif pour les différentes disciplines et communautés de chercheurs qui y participent.

De ce mouvement résultent aujourd'hui d'authentiques renouvellements dans les démarches de recherche. Ces renouvellements se manifestent notamment par : (a) un effort pour le *traitement concerté de concepts partagés* (tel le concept de représentation); (b) un travail significatif en direc-

tion de la *modélisation*; (c) des *couplages épistémologiques ou opérationnels* que le précédent rapport de conjoncture qualifiait de "mariages réussis"; (d) à l'intérieur de certaines disciplines cognitives, l'émergence *d'approches spécifiques* sous l'effet de rencontres résolument interdisciplinaires (par exemple, dans les neurosciences, le développement des neurosciences dites computationnelles).

Il faut souligner ici l'évolution même de la pratique de l'interdisciplinarité dans le champ des sciences de la cognition. La philosophie des échanges interdisciplinaires au sein des sciences cognitives s'est exprimée d'abord sous la forme d'emprunts *d'outils* et de *méthodes*, puis d'emprunts de nature *conceptuelle*. Par la suite seulement commencèrent à se produire de réelles *convergences* sur des noyaux conceptuels communs. Ce fut le cas pour le concept de *représentation*, mais d'autres notions prennent aujourd'hui de l'importance, comme celles *d'intelligence* et *d'adaptation*, et de plus en plus, celles *d'organisation*, de *distribution* et de *coopération* (entre agents cognitifs, entre processus, entre modes de représentation).

La période très récente est marquée par l'extension significative des champs d'activité des sciences de la cognition. A titre d'exemple, dans un

découpage thématique encore récent, *tes processus affectifs* étaient considérés comme situés en dehors du spectre d'intérêt des sciences cognitives. Or la sphère émotionnelle et le domaine de la psychopathologie font aujourd'hui l'objet d'approches explicitement cognitives. Un autre exemple d'extension est celui de l'étude des *performances collectives* (depuis celles des sociétés d'insectes jusqu'à celles d'agents fonctionnant dans un système économique).

On relève dans le même temps une *évolution des paradigmes*. Une évolution particulièrement significative est celle qui, partant des *modèles symboliques*, se réexprime aujourd'hui en termes *connexionnistes*. Une conception longtemps prééminente a consisté pour les chercheurs à raisonner sur des modules de traitement reliés au sein d'architectures supervisées par des mécanismes de contrôle (ces modèles impliquant généralement une organisation spialisée de la mémoire). A cette conception tend à se substituer l'idée d'unités de traitement (équivalents de cellules nerveuses) et de connexions (équivalents de synapses), dont les lois de fonctionnement sont fondées sur les lois d'entrée-sortie des unités et sur la transformation des forces de liaison entre les unités. L'apprentissage est considéré comme résultant des modifications de connectivité réalisées à l'intérieur des unités et entre des ensembles d'unités.

On relève surtout la *multiplication des champs disciplinaires* dont les représentants se perçoivent et se déclarent concernés par les thématiques cognitives. Des manifestations d'intérêt s'expriment de la part de disciplines qui, il y a peu, ne figuraient pas classiquement parmi les disciplines faisant partie des sciences cognitives. Tel est le cas, en particulier, de *l'anthropologie*, de *l'économie*, mais aussi de *l'écologie*, de la *biochimie*. Cette extension est telle qu'elle impose à la communauté une certaine vigilance. Un autre signe méritant réflexion est le fait qu'à l'occasion de la préparation du *Rapport de conjoncture*, près d'une section du Comité National sur deux a souhaité participer au groupe de travail qui a produit le présent document.

Un nombre croissant de rapports et de colloques témoignent d'une dynamique bien implantée dans des lieux variés. En outre, des initiatives institutionnelles significatives ont été prises dans les récentes années en France et au niveau européen. Il devient nécessaire aujourd'hui de passer à la réalisation d'un plan de soutien effectif et concerté. Ce plan devrait se dessiner en fonction des percées prospectives que le présent rapport a pour mission de souligner et en tenant compte du fait que le domaine des sciences cognitives est encore loin d'être unifié du point de vue théorique. A cet égard, il paraît salubre d'explicitier l'existence de tensions épistémologiques plutôt que de laisser croire à un consensus scientifique exempt de présupposés sur la cognition.

Trois grands domaines sont abordés dans le présent rapport (où l'accent va être mis sur les tendances nouvellement apparues).

- Nous avons considéré pour commencer la cognition en tant que *produit et manifestation de systèmes naturels*, tant au niveau *individuel* qu'au niveau *collectif*. On notera à ce propos que l'accent, dans les sciences cognitives, a longtemps été mis sur les approches individualistes. Une réelle extension des problématiques se dessine donc actuellement.

- Nous avons ensuite examiné la cognition telle qu'elle est réalisée et modélisée dans des *systèmes artificiels* et nous avons considéré le problème de l'adaptabilité de la cognition naturelle à ces systèmes (notamment dans les interactions homme-machine). Cognition naturelle et cognition artificielle ne doivent toutefois pas être vues comme relevant de compartiments étanches. Ce que révèlent en fait de plus en plus les recherches, ce sont les *liaisons* et les *analogies* entre les deux formes de cognition.

- Nous avons traité enfin des avancées actuelles de la recherche en matière de *modélisation* (modélisation en logique et en sciences du langage, réseaux de neurones formels, cognition distribuée, modélisation des organisations complexes).

Ces trois niveaux doivent être pensés et décrits sous l'angle de leur continuité plutôt que comme des niveaux d'approche disjoints.

Les travaux menés dans la communauté des sciences cognitives répondent à trois familles d'enjeux : (a) des enjeux "*cognitifs*" (les sciences de la cognition étant vues comme des activités dirigées vers la connaissance de la connaissance); (b) des enjeux *sociaux* et des enjeux *industriels* (lorsque sont considérées les possibilités de mise en interface avec les industries productrices de systèmes avec lesquels doit interagir la cognition d'opérateurs humains); (c) des enjeux au plan de la *remédiation* et de la *réparation* (si Ton considère en particulier les recherches neurofonctionnelles et les recherches neuropharmacologiques).

Le présent rapport concerne les sciences tournées vers l'étude de la *cognition* et de la *communication*. Nous n'avons ni l'ambition ni la possibilité de traiter du thème de la communication dans son entièreté et sa diversité. Nous n'avons pris en charge que les aspects de la communication qui sont en rapport avec les processus cognitifs : partage de représentations, multimodalité dans les interactions homme-machine, sociétés d'agents cognitifs. En ce sens, nous faisons nôtre l'idée que le couplage méthodologique entre les problématiques de la cognition et celles de la communication reste à approfondir.

## LA COGNITION NATURELLE

Le sujet humain est sans doute le premier système naturel à avoir été considéré par des chercheurs sous l'angle de ses capacités cognitives. La cognition, cependant, n'est pas le propre de l'homme. Les conduites cognitives tendent aujourd'hui à être replacées par les scientifiques dans le contexte plus général des *comportements adaptatifs*, avec un intérêt marqué pour les espèces non humaines, et singulièrement pour les espèces où une pluralité d'agents concourent, sous des formes comportementales coordonnées, à des objectifs adaptatifs.

## 1 - ASPECTS INDIVIDUELS

L'homme est considéré ici comme un agent cognitif, c'est-à-dire en tant que système interagissant avec son environnement et construisant sans cesse des représentations issues de ces interactions. Ces représentations résultent du traitement d'informations de diverses natures. L'approche illustrée ici s'inscrit dans la continuité d'un courant largement représenté en *psychologie cognitive*, et qui se donne pour objectif de rendre compte : (a) de la *nature des représentations mentales* et de leur *structure*, (b) de la *mise en place du répertoire des représentations* au cours de l'ontogenèse; (c) de la nature et du fonctionnement des *processus* opérant, sur ces représentations (exploitation de leur contenu informationnel, coordination de représentations, raisonnements, transformations).

Une évolution sensible des perspectives en psychologie cognitive s'est manifestée ces dernières années, sous l'effet des contacts établis avec l'*intelligence artificielle* et avec les *neurosciences*. Ainsi observe-t-on une prise en compte de plus en plus marquée des contraintes liées à l'*ancrage biologique* des grandes fonctions cognitives. On assiste également au développement des *hypothèses modulaires*, qui ont notamment pour objectif de rendre compte des traitements en parallèle de l'information (après une époque de la psychologie cognitive fortement marquée par les modèles sériels). L'idée d'une *pluralité de systèmes* est également reconnue (idée à rapprocher de la notion de multimodalité que l'on verra mentionnée plus bas). Cette notion impose au chercheur de faire des hypothèses détaillées sur les propriétés de chacun des systèmes envisagés et sur le répertoire des processus susceptibles d'y opérer. Ainsi se construit une approche analytique et intégrative des différents processus. Une question demeure cependant ; celle des facteurs assurant la cohérence et l'unité des expériences perceptives (par exemple, visuelles), qui apparemment ne gardent pas trace des subdivisions fonctionnelles réalisées par le système perceptif.



## Le fonctionnement cognitif humain

Rendre compte de la cognition humaine et la modéliser constituent évidemment un objectif spécifique des disciplines classiquement tournées vers l'homme (psychologie et neurosciences cognitives), mais cet objectif est aujourd'hui largement redéfini par les rencontres avec les autres disciplines cognitives. Ainsi la cognition humaine peut-elle, en particulier, être approchée dans les situations où elle interagit avec *d'autres systèmes* produisant des *sorties intelligentes* (d'où l'importance des relations établies entre psychologie, intelligence artificielle et sciences de l'ingénieur), sans oublier bien sûr le champ des interactions avec toutes les autres facettes de l'environnement. Un enjeu non moins important est celui de l'identification des *supports et dispositifs biologiques des fonctions cognitives* (problème partagé par la psychologie et les neurosciences cognitives). Enfin, les *aspects développementaux* doivent être pris en compte : la compréhension des fonctions cognitives implique de plus en plus une élucidation des processus qui construisent les systèmes par lesquels ces fonctions s'expriment.

- Une forte reprise en charge des relations entre *cognition et action* est aujourd'hui perceptible. Cet intérêt se manifeste notamment dans les études sur la perception, la programmation et le contrôle du mouvement. Le rôle des systèmes moteurs dans la connaissance du monde et dans l'adaptation au monde constitue un thème particulièrement saillant. Des hypothèses nouvelles se développent sur la nature et l'organisation de la représentation interne du mouvement (sous forme de "programmes" ou "schémas moteurs"). La production du mouvement et son contrôle par l'utilisation des réafférences sont analysés avec pour objectif de rendre compte des différents niveaux d'intégration sensori-motrice (du niveau automatique au niveau du mouvement intentionnel). Les liens avec la *robotique* sont ici essentiels et connaissent un fort développement.

- La *perception* et la *représentation mentale des objets* continuent de représenter un thème majeur

pour la psychologie cognitive. Il s'agit, en particulier, de rendre compte de la manière dont le système cognitif construit de l'invariance à partir de la variété des situations perceptives. Les problèmes de catégorisation et de prototypie sont de plus en plus traités dans des approches pluridisciplinaires. Un champ problématique semble surtout connaître un développement notable : l'approche *multimodale* de la cognition. Le système cognitif dispose en effet de modes de représentation follement différenciés - images, langage, geste, etc., - et qui, de fait, co-opèrent avec efficacité dans le fonctionnement naturel. Le problème de la traduction réciproque des différents modes de représentation est présent au sein de nombreuses thématiques cognitives (raisonnement symbolique et raisonnement analogique, processus linguistiques mis en œuvre dans la description de scènes visuelles, etc.). Une approche systématique des problèmes créés par ces interfaçages multimodaux s'impose évidemment aux chercheurs,

- La thématique de la *cognition spatiale* connaît pour sa part une actualité renouvelée. L'accent est mis sur la variété des modes d'apprentissage des environnements spatiaux (apprentissage perceptif et ambulateur; apprentissage à partir d'intermédiaires symboliques : cartes, mais aussi descriptions verbales des environnements). On s'intéresse à la capacité de ces différents médias à construire des représentations qui soient ensuite efficacement exploitées dans la planification des déplacements et la gestion des actions. En particulier, la contribution de l'imagerie mentale à l'élaboration des cartes cognitives est activement explorée. Ce secteur de recherche se prête à des interactions intéressantes avec les disciplines tournées vers la *cartographie* et, plus généralement, la *sémiologie* et la *modélisation graphique*,

- Les problématiques de l'*apprentissage* et de la *mémoire* constituent toujours un chapitre majeur de la recherche sur la cognition. L'étude des processus d'activation a été l'occasion de marquer la différenciation, mais aussi la complémentarité, entre les aspects automatiques et les aspects contrôlés du fonctionnement cognitif. La mémoire, comme ins-

trument de connaissance du passé, est également de plus en plus considérée comme outil de traitement de l'information présente et instrument actif de l'anticipation cognitive. Dans cette perspective, les *modèles neuro-mimétiques* développés aujourd'hui s'expriment sous forme de simulations physiques (et non plus seulement mathématiques). La notion de mémoire de travail a connu, pour sa part, un renouvellement, avec le développement<sup>1</sup> de la conception de systèmes fonctionnellement distincts (système verbal, système visuo-spatial), opérant sous le contrôle d'un superviseur central.

- Dans les études sur le *raisonnement*, héritières de deux traditions souvent antagonistes - celle des logiques formelles et celle des logiques naturelles, - plusieurs approches sont développées : (a) la tradition de la "logique mentale", qui impute aux individus la possession d'un ensemble de règles formelles; (b) la théorie des "modèles mentaux", selon laquelle le sujet utilise des processus inférentiels pour construire une représentation du monde et formuler des conclusions à la fois vraies dans le modèle et sémantiquement informatives; (c) l'approche pragmatique, en termes de règles sensibles au contenu et au contexte des inférences; (d) l'approche en termes d'heuristiques. Une caractéristique importante des travaux récents est la mise au point de protocoles expérimentaux sophistiqués, dans lesquels les temps de réponse peuvent être rapportés à la complexité algorithmique des différentes procédures exécutables sur machine.

- Le *langage* continue de jouer, dans les approches cognitives, un rôle pivot, non seulement par son statut de production humaine spécifique, donc central en psychologie cognitive, mais aussi comme lieu privilégié de convergence avec les autres disciplines cognitives. Les étapes du *traitement lexical* sont de plus en plus abordées dans des programmes coordonnés combinant l'approche comportementale, les méthodes électrophysiologiques et la modélisation connexionniste. À un niveau de complexité plus élevé du traitement linguistique, on relève que la *compréhension* et la *production du langage* sont de plus en plus traitées sous l'angle de leur complémentarité et de la com-

munauté des opérations sémantiques et cognitives qu'elles impliquent. Enfin, les *études inter-langues* se multiplient, avec pour objectif de révéler les processus cognitifs généraux sous-tendant l'organisation discursive des langues et les représentations du monde qui leur sont associées.

- Enfin, l'étude des *attitudes propositionnelles* occupe une place toujours importante dans la recherche contemporaine. Cette étude soulève des questions touchant à la "philosophie de l'esprit" et à la philosophie du langage (faut-il interpréter les attitudes comme des relations du sujet à des représentations internes ? Ces représentations mentales sont-elles analogues aux phrases d'un langage ?) et des questions de caractère logico-sémantique, qui touchent à la pertinence des logiques intentionnelles ou bien de formalismes plus appropriés pour le traitement des énoncés d'attribution d'attitudes.

## Les mécanismes cérébraux

Dans le domaine des neurosciences, les progrès de la recherche ont été rapides et considérables, surtout au cours des deux dernières décennies. Il faut signaler l'énorme effort consacré à la compréhension des maladies neurologiques et à la mise au point de moyens de traitement efficaces. Cependant, pour un grand nombre de chercheurs, le but principal reste avant tout la compréhension des grandes fonctions cognitives (perception, attention, mémoire, action).

Ces progrès rapides sont dus au développement de techniques de plus en plus sophistiquées. Les années quatre-vingts ont vu la mise au point de la *tomographie par émission de positons*, qui fournit chez le sujet malade de riches informations sur les zones cérébrales impliquées dans certains problèmes psychiatriques tels que la dépression et l'anxiété. Toutefois, les techniques tomographiques ont le grand avantage d'être utilisables chez le sujet normal. Il devient alors possible d'identifier les structures cérébrales activées pendant l'exécution de tâches comportementales ou cognitives (attention visuelle, imagerie mentale, compréhension du

langage, motricité fine). De nouvelles techniques, comme la *magnétoencéphalographie*, également utilisables chez le sujet normal, permettent de dépasser les limitations de précision temporelle de la tomographie par émission de positons.

Par ailleurs, dans des domaines aussi variés que l'attention visuelle, la perception visuelle ou le contrôle du mouvement, les mécanismes cérébraux sont également abordés par *l'enregistrement de l'activité neuronale* chez l'animal éveillé exécutant une tâche comportementale. Enfin, d'autres travaux révèlent que dans certaines zones corticales à haut niveau d'intégration, les réponses cellulaires peuvent présenter une sélectivité telle que seuls certains stimulus complexes, des visages par exemple, sont capables d'activer les neurones.

Les *techniques anatomiques* ont, elles aussi, considérablement progressé. Au cours des récentes années, de nombreuses aires corticales visuelles ont été mises en évidence. Les progrès ont été également rapides dans la mise en évidence des bases cérébrales de la mémoire, tant au niveau structural qu'au niveau cellulaire. Les phénomènes de plasticité cellulaire, fondamentaux dans la compréhension de ces types de processus, ont fait l'objet d'analyses minutieuses. Un exemple en est la meilleure connaissance des mécanismes biochimiques impliqués dans la plasticité synaptique (potentialisation à long terme).

L'un des objectifs majeurs qui se dégage de l'ensemble des recherches effectuées en neurosciences au cours des dix dernières années est la compréhension du fonctionnement cérébral en termes de *systèmes coordonnés de traitement d'informations*. Cette ouverture des "neurosciences computationnelles" s'oriente vers l'analyse du codage et du décodage des informations sensorielles (visuelles, auditives, olfactives, etc.) et motrices dans les circuits cérébraux. En fait, l'efficacité dont font preuve les neurones est si remarquable que de nombreux chercheurs tentent de mettre au point des systèmes de traitement d'information calqués sur les concepts établis par les neurosciences. C'est le cas des *systèmes connexionnistes*. La notion d'or-

dinateur neuronal devient commune, et si les potentialités de ce domaine de recherche doivent être encore évaluées prudemment, ce champ d'application des neurosciences apparaît d'une importance grandissante.

En résumé, trois grands types d'interactions sont identifiables pour les neurosciences. D'une part, la collaboration avec la médecine vise à la compréhension et au traitement des problèmes cliniques en neurologie. D'autre part, la collaboration avec la psychologie tente d'améliorer notre compréhension de l'infrastructure cérébrale des grandes fonctions cognitives. Enfin, les recherches en liaison avec les théoriciens et les chercheurs en informatique et en intelligence artificielle sont appelées à se développer dans les années à venir.

## Les comportements adaptatifs et leurs bases biologiques

Une caractéristique majeure des neurosciences est que celles-ci se trouvent de plus en plus impliquées dans l'analyse de conduites cognitives impliquant un haut degré d'*intégration*. Il s'agit là d'une passerelle nouvelle en direction des activités symboliques. Une autre passerelle nouvellement établie est celle qui relie neurosciences et communication animale, à travers l'approche neurobiologique des comportements adaptatifs.

*L'adaptation* est une réalité observable à différents niveaux d'organisation du monde vivant. Au niveau individuel, elle se traduit par l'apparition, parmi plusieurs conduites, de celle qui se révèle la mieux adaptée à la situation. L'adaptation est un processus dynamique mettant en jeu de manière coordonnée des critères physiologiques, métaboliques et comportementaux, en réponse à des variations du milieu environnant. Le système nerveux, central joue un rôle essentiel dans cette coordination. Il permet à l'individu de confronter ses perceptions à la représentation interne qu'il a de l'environnement dans lequel il évolue. C'est de ces perceptions que dépendent l'élaboration de plans d'action, l'évaluation de leurs conséquences et, en



définitive, la plasticité des conduites en fonction de l'expérience. Les *approches "cognitivistes"* du comportement animal ont eu ici une influence décisive. Les *approches neurobiologiques* plus récentes nous rappellent que les conduites ont leur origine dans le fonctionnement d'un cerveau lui-même régulé par des facteurs d'origine viscérale, hormonale et même immunitaire,

*L'éthologie* ajoute à la description des comportements l'étude des sources de leurs variations interindividuelles et de leur contribution à l'évolution. Cette étude représente un préalable indispensable à la compréhension de l'*organisation des conduites* et à l'étude des *communications interindividuelles*. Le développement de l'*éco-éthologie* correspond à la nécessité de la gestion rationnelle des populations. Cette orientation privilégie les travaux sur la *dynamique des stratégies d'adaptation* (travaux incluant la modélisation des stratégies et des mécanismes de leur variabilité génétique) et sur les modalités de la *communication* à l'intérieur d'une espèce ou entre espèces.

La neurobiologie des comportements étudie les mécanismes neuronaux impliqués dans la détermination des conduites. Les recherches sur la *plasticité des conduites* et leur mise en place au cours de l'*ontogenèse* sont de ce fait appelées à se développer. Un domaine également en pleine expansion est celui des processus de traitement de l'information, avec les tentatives de *modélisation du fonctionnement des réseaux neuronaux impliqués*. Plus spécifiquement, la neurobiologie des adaptations vise à étudier les conditions neurobiologiques des processus adaptatifs (dans l'exploitation du milieu environnant, dans les résistances aux agressions), mais aussi les facteurs d'ordre génétique ou acquis capables de moduler ces processus.

Ainsi, l'étude des contraintes exercées par les facteurs d'environnement sur les capacités d'adaptation des animaux (le stress) et des états mentaux sous-jacents (les émotions) se trouve profondément renouvelée par la mise en évidence des interactions entre le *comportement* et les *réponses neuroendocrines*. Le développement de l'utilisation des tech-

niques de biologie cellulaire et moléculaire s'impose donc ici pour caractériser les réseaux neuronaux en jeu, les signaux de communication cellulaires et leurs récepteurs, ainsi que les mécanismes d'expression transitoire des gènes placés sous le contrôle de ces signaux. Ces techniques permettent notamment de spécifier le rôle joué par les mécanismes en question dans la re-programmation spécifique des fonctions psychologiques sous-tendant les processus adaptatifs.

## Emergences

On assiste aujourd'hui à l'émergence de nouvelles contributions, comme celles émanant de l'écologie, de la chimie biologique et de la neuropharmacologie.

- Une manifestation d'intérêt s'exprime de la part de l'*écologie*, science elle-même placée à l'interface de nombreuses disciplines. L'écologie considère en priorité les relations des organismes avec leur environnement. L'effort reproducteur, la recherche des nutriments et les stratégies d'occupation de l'espace sont étroitement liés à la perception de l'environnement. L'optimisation de ces échanges est rendue possible par des transferts d'informations entre l'individu et son milieu physique, son milieu biotique, ou encore entre individus de la même espèce. La socialisation est vue sous l'angle de l'optimisation de l'occupation du milieu. La régulation des relations interindividuelles fait donc appel à des systèmes de communication (qui traduisent le niveau de complexité des systèmes sociaux propres aux espèces).

- Par ailleurs, l'environnement chimique interne de l'individu conditionne ses états nerveux et ses comportements. L'environnement chimique externe (signaux olfactifs) influence lui aussi nombre de comportements individuels et collectifs. Les enjeux de la *biochimie* (étude chimique des systèmes biologiques) et de la *chimie biologique* (élaboration de molécules de synthèse reproduisant des activités biologiques) sont pour l'instant des enjeux de recherche fondamentale et de recherche médicale,

mais les échanges avec les sciences traitant de la cognition devraient déboucher sur des coopérations pertinentes.

- Enfin, des liens avec la *neuropharmacologie* doivent être signalés, dans la perspective de la mise au point de molécules susceptibles de contribuer à la réparation de fonctions cognitives altérées. Le médicament est utilisé aujourd'hui comme outil d'investigation, en particulier dans l'étude des processus liés à la mémoire.

## 2 - ASPECTS SOCIAUX

### La cognition sociale

La cognition humaine possède une caractéristique spécifique : elle prend toujours place dans un *contexte culturel et social*. Le point de vue de la "cognition sociale" consiste à comprendre comment les individus perçoivent le monde et les relations sociales qui sont censées le fonder. Ce courant en fort développement est issu d'un ensemble d'intérêts de la psychologie sociale pour la formation des impressions, la mémoire des personnes, la perception d'autrui, l'attribution causale, les représentations sociales.

A un niveau fonctionnel, l'objectif est de décrire et de comprendre comment la cognition de l'individu se construit dans *l'interaction avec son environnement* et par quels mécanismes et quelles compétences l'individu construit cet univers cognitif. Il s'agit encore de comprendre comment les produits de cet univers cognitif s'échangent, se partagent, donc se "socialisent", et agissent en retour sur l'appareil cognitif individuel.

Dans ce contexte, le sujet humain est appréhendé comme *individu doté de mémoire*. L'intérêt se porte sur des contenus de la mémoire humaine ne résultant pas du traitement des seules propriétés intrinsèques des objets (que ces objets soient ou non des objets sociaux). La mémoire est aussi le

produit du rapport que le sujet entretient, en fonction de ses insertions sociales, avec ces objets. L'univers cognitif humain traduit donc le résultat du traitement et de l'intégration d'un environnement, qui est toujours socialement déterminé.

Si l'on admet que ce qui est mis en mémoire correspond non seulement à l'information, mais aussi à la façon dont cette information a été traitée, on peut raisonnablement envisager que le sujet encode à la fois l'information et le contexte de survie de cette information. Or ce contexte est largement constitué des conditions sociales et émotionnelles dans lesquelles est placé le sujet au moment où il traite l'information, élabore une attitude ou une stratégie, ou encore gère un mécanisme pour donner une cohérence à son environnement.

Les processus de *catégorisation sociale*, la genèse des *attitudes* et le fonctionnement des *croyances* (qui entretiennent elles-mêmes des liens avec certains problèmes rencontrés par la didactique) sont notamment des thèmes sur lesquels une psychologie sociale cognitive est en position d'apporter des éclairages spécifiques. Les liens avec l'anthropologie cognitive doivent être ici renforcés.

### Les approches anthropologiques

Les sciences sociales, dans leur ensemble, se déclarent de plus en plus concernées par les thématiques et les perspectives cognitives. Ainsi, pour *l'anthropologie cognitive*, un intérêt marqué s'est manifesté depuis longtemps pour l'étude des notions de *classification* et de *catégorisation*, telles qu'elles sont mises en œuvre par les sociétés dites primitives. L'interface avec la linguistique et la psychologie cognitive est ici manifeste. Il existe dans ce domaine des travaux, déjà classiques, sur les fondements des systèmes classificatoires présents dans les sociétés humaines (botanique, zoologie, systèmes de parenté). Une interrogation a largement circulé à ce propos entre l'anthropologie et la psychologie cognitive, à savoir celle des fondements cognitifs des systèmes naturels de la catégorisation.

Une autre perspective de recherche s'attache à l'analyse du statut logique des *croyances* et des *causalités*. L'anthropologie contribue ainsi à préciser la notion de *représentation* (et celle de représentations partagées), qui constitue l'un des pivots des sciences de la cognition.

## LA COGNITION ARTIFICIELLE

Nous avons relevé plus haut que, dans les environnements actuels, la cognition humaine révèle une bonne partie de ses capacités dans ses interactions avec des systèmes artificiels produisant des sorties intelligentes. Deux enjeux majeurs s'ensuivent pour les chercheurs : créer des *systèmes artificiels* qui se comportent comme des agents cognitifs dotés de capacités rationnelles (computationnelles); faire porter par ces systèmes des *représentations* et des *modes de traitement* qui soient fonctionnellement compatibles avec ceux des opérateurs humains (ce problème est partagé par l'*intelligence artificielle* et la *psychologie cognitive*, avec d'importantes implications en *linguistique*, en *ergonomie*, en *didactique*).

Il existe à l'heure actuelle un certain nombre de tendances émergentes en intelligence artificielle :

- *Les systèmes multi-agents*. L'intérêt qu'ils suscitent s'ouvre aujourd'hui sur les problèmes dits de "*groupware*" et l'élaboration de modèles de coopération. Un domaine électif d'application est celui de la coordination des échanges et des conversations en vue de l'élaboration d'un objet commun (par exemple, rédiger un texte),

- *L'auto-organisation*, Par exemple, en reconnaissance de la parole, l'accent est mis actuellement sur la collecte de grands nombres de données et sur la mise en œuvre de modèles auto-organiseurs. Dans ce domaine, la comparaison des performances des modèles statistiques (markoviens) et *des* modèles neuronaux paraît tourner à l'avantage des premiers.

- *Les mondes virtuels*. L'objectif de ce courant de recherche est de modéliser le monde physique pour pouvoir agir sur lui.

- *l'aide à la décision*. Les systèmes experts et, plus généralement, les systèmes interactifs à base de connaissances constituent des domaines largement ouverts aux transferts de technologie,

- *La multimodalité*, Ici se posent tous les problèmes de traduction, de coopération, d'interaction entre modes de représentation ou modes de traitement.

### 1 - RAISONNEMENT ET TRAITEMENT AUTOMATIQUE DU LANGAGE

L'esprit humain est capable de différentes formes de *raisonnement* pour faire face au caractère incomplet, incertain, qualitatif ou partiellement contradictoire des informations dont il dispose. L'*intelligence artificielle* cherche à formaliser ces raisonnements de façon rigoureuse et efficace, avec pour but de faire exécuter par l'ordinateur un raisonnement dont les résultats satisfassent des critères rationnels explicites. Dans une perspective de communication avec l'utilisateur, il importe de pouvoir expliquer comment et pourquoi le système est arrivé à telle ou telle conclusion. Complémentairement, la compréhension, à partir de modèles, des raisonnements d'un utilisateur, notamment de ses "fautes" et "contradictions", est particulièrement cruciale dans les développements de la communication homme-machine, de même qu'en enseignement assisté par ordinateur.

Depuis une dizaine d'années, ces questions ont suscité un grand nombre d'approches, qui cherchent à pallier les limitations expressives et déductives de la logique classique pour le traitement d'informations ni certaines, ni précises, ni éventuellement totalement cohérentes. Ces approches ont cependant besoin d'être davantage fondées du point de vue théorique, mais aussi du point de vue empirique (ce qui implique des échanges soutenus



avec la *linguistique* et avec la *psychologie cognitive*). Un certain nombre de perspectives empruntent ici à l'idée commune de préférence entre situations possibles du monde. Cette idée peut être formalisée dans le cadre des *logiques modales*, mais elle se retrouve également dans une vision *nonprobabiliste* de la théorie des possibilités. Ces approches sont étroitement reliées à la problématique de la révision des bases de connaissances lorsque doivent être traitées de nouvelles informations, en partie contradictoires avec le contenu de ces bases.

Les résultats obtenus en intelligence artificielle en matière de *formalisation des raisonnements* intéressent donc les sciences cognitives à divers titres, tout d'abord pour proposer un cadre théorique satisfaisant pour la diversité des formes de raisonnement (comme le font les nouvelles approches de l'inférence et les théories probabilistes ou non-probabilistes de l'incertain), mais aussi pour donner une base épistémologique plus solide à l'observation des argumentations et des raisonnements naturels.

En matière de *systèmes experts*, l'accent est mis aujourd'hui sur l'acceptabilité, par l'utilisateur, des conclusions fournies par les systèmes et la capacité de ces derniers à expliquer de manière satisfaisante leur raisonnement, leurs conclusions et leurs conseils. La *génération d'explications* dans les systèmes experts mobilise ainsi un grand nombre d'efforts. Le but est de développer des systèmes capables de produire de bonnes explications interactives à la fois sur le raisonnement du système et sur les connaissances mises en jeu.

Conjointement, les enjeux scientifiques et socio-culturels liés au *traitement du langage*, écrit ou oral, sont aujourd'hui plus que jamais essentiels, précisément parce que le langage naturel est de plus en plus utilisé dans le cadre de *traitements automatisés* (télématique, bureautique) comme support de connaissances au travers de vastes bases de données textuelles. La mise en œuvre de traitements évolués nécessite donc de dépasser le simple stade de la manipulation de textes et d'intégrer de véritables fonctions interprétatives du langage, qui

est appelé pour sa part à être le moyen de communication privilégié entre l'homme et la machine. L'exploitation des bases de connaissances et l'interface avec les systèmes automatisés nécessitent des *interfaces langagières* qui soient les plus naturelles possibles pour l'homme.

Après une première étape où le traitement automatique du langage naturel a été considéré comme une simple partie de l'informatique, on sait aujourd'hui qu'il est nécessaire de comprendre comment les humains opèrent en langage naturel pour qu'une machine approche d'un comportement analogue. Pour que des systèmes de traitement du langage soient alors réellement satisfaisants, ils doivent réaliser des *inférences* appropriées à partir de ce qui leur est dit et, inversement, leur comportement doit permettre à l'interlocuteur les inférences qu'il fait habituellement en utilisant la langue. Ainsi apparaît-il clairement qu'au-delà d'une compréhension de surface de la langue, il faut mettre en œuvre une compréhension de ses implications profondes, principalement des *buts*, des *intentions* et des *stratégies* de l'interlocuteur.

Un autre point important a été mis en évidence : la quantité des connaissances nécessaires est telle qu'il faut soit réaliser des logiciels capables d'*apprentissage à partir d'expériences*, soit faire des descriptions du monde et de la langue qui soient *complètes* et qui aient un degré élevé de *finesse*. Un exemple typique est celui des bases de données lexicales ou dictionnaires informatisés.

On sait, à l'heure actuelle, réaliser des logiciels de traitement des langues déjà très utiles, et l'on peut espérer dans un proche avenir disposer de systèmes encore plus efficaces. Il faut aussi souligner que les dernières années ont vu des améliorations importantes du matériel et des logiciels. Il devient ainsi possible d'envisager des ordinateurs dont les architectures soient mieux adaptées au traitement automatique des langues, comme le montrent déjà les travaux réalisés dans le domaine des mémoires associatives, des mémoires distribuées et des processeurs spécialisés.

## 2 - COMMUNICATION HOMME-MACHINE

L'amélioration de la communication entre l'homme et la machine est assurément un enjeu important. Les chercheurs dont l'ambition est de doter la machine de facultés similaires aux facultés humaines sont amenés à prendre en compte de nombreux aspects : *traitement automatique de la parole* (reconnaissance et synthèse), du *langage écrit* (analyse et génération), de l'*information visuelle* (analyse de scènes et synthèse d'images) et, depuis peu, du geste (interface gestuelle et reconnaissance du geste) et même des *odeurs*. Les aspects cognitifs sont tout à fait présents : acquisition et représentation des connaissances, raisonnement, planification, aide à la décision, résolution de problèmes, fusion de senseurs perceptifs, apprentissage.

La tendance nouvelle est que les recherches sur ces différents modes de communication, jusque-là nettement séparées, se rapprochent de plus en plus les unes des autres. Cette tendance résulte du fait que des méthodes très voisines de *reconnaissance des formes* peuvent être appliquées à différents domaines. D'autre part, les chercheurs visent de plus en plus à traiter de la *communication multimodale*. Enfin, il apparaît que les méthodes à base de connaissances tendent à céder le pas au profit des *méthodes organisatrices*, qui utilisent des algorithmes d'apprentissage travaillant sur de grosses bases de données, dans la mesure où l'explicitation et la représentation des connaissances de nature perceptive restent des tâches encore extrêmement complexes.

La communication homme-machine constitue donc non pas une discipline, mais plutôt un ensemble de problèmes. Il s'agit d'un champ scientifique hautement interdisciplinaire qui prend en compte un tripler : *[l'opérateur, la machine, l'objet de l'activité]* (sans oublier le contexte dans lequel se développent leurs interactions). On y trouve représentées les *sciences de l'ingénieur* (traitement du signal, reconnaissance des formes, intelligence artificielle, biomécanique, acoustique), les *sciences de la*

*vie* (psychologie, neurosciences) et les *sciences de l'homme et de la société* (linguistique). En outre, par les modèles qu'elle propose, la physique est également concernée.

Le concept même de communication homme-machine évolue encore avec les nouveaux modes de communication (vision, gant numérique), qui permettent au système de construire un modèle de l'utilisateur et de ses actions. L'utilisateur, ainsi, est lui-même une partie de la modélisation de l'univers de la tâche. Il évolue dans cet univers, il agit sur lui, il en perçoit les réactions. La machine transmet alors une représentation réelle du monde physique, une réalité modifiée, ou encore produit un monde physique reconstruit (ou "*réalité virtuelle*").

En communication homme-machine, la tendance consiste aujourd'hui à compléter la structuration thématique traditionnelle (parole, langage, etc.) par une structuration croisée (qui distingue les sciences dirigées vers la connaissance et le domaine des applications). Dans ce domaine, un exemple de mariage réussi est celui résultant de la coopération menée entre *phonéticiens, linguistes et ingénieurs informaticiens*. Les nouveaux outils donnés aux phonéticiens ont fait apparaître de nouveaux problèmes et de nouvelles approches. Il serait intéressant que cette forme de coopération puisse s'étendre au domaine de la vision, où persistent encore nombre de problèmes liés au traitement de l'image et aux méthodes permettant de la mettre en machine. Ici se retrouve le problème récurrent du passage du signal au niveau symbolique. La nécessité de développer les rapprochements entre spécialistes des différentes modalités (par exemple, entre les chercheurs qui travaillent sur la vision et ceux qui travaillent sur la synthèse d'images) s'affirme très nettement.

## 3 - ASPECTS ERGONOMIQUES

La réalisation d'interfaces logicielles offre l'opportunité d'identifier de manière plus systématique un certain nombre de problèmes cognitifs. Chacun.

convient de la nécessité du point de vue de l'*ergonomie*, situé à l'Interface des problèmes de *cognition* et de *communication*. L'enjeu social est d'autant plus important : l'informatisation accrue des contextes professionnels produit des transformations profondes des outils de travail, et ces transformations sont durables. Cette situation crée une occasion de mise en œuvre des connaissances acquises en psychologie cognitive dans des dispositifs créant une amélioration des conditions de travail et une plus grande fiabilité des systèmes homme-machine.

Les recherches en psychologie cognitive ergonomique ont d'abord essentiellement porté sur des *problèmes de formation*, à une époque où les outils étaient peu flexibles et modifiables. Devant le développement de logiciels spécifiques à certaines tâches, c'est vers l'*ergonomie des logiciels* que se sont dirigées les recherches (par exemple, sur les éditeurs de texte). Ces recherches se sont alors orientées vers les aides logicielles à la réalisation de tâches dépassant l'utilisation des logiciels eux-mêmes (par exemple, les *aides à la décision* dans le contrôle de processus). Il est à noter que cette évolution s'est faite en parallèle avec une évolution des perspectives menant d'une ergonomie tournée vers la réparation à une ergonomie de conception.

Parmi les problématiques actuelles, l'ergonomie doit encore traiter de la question importante de la compatibilité (sémantique et syntaxique) entre les *langages d'interaction homme-machine* et les *systèmes de représentation et de traitement* de l'utilisateur (sémantique de l'action, langages opératifs). Une autre perspective importante est celle du contrôle des *environnements dynamiques* (c'est-à-dire évoluant en dehors des actions de l'opérateur). L'approche cognitive des situations de travail coopératives, en vue de définir des aides à la coopération, constitue elle aussi un thème en émergence. Elle débouche notamment sur la spécification et la conception de *systèmes experts coopératifs* laissant à l'utilisateur le contrôle de la réalisation de la tâche.

Au-delà des interactions homme-machine, une partie de l'ergonomie cognitive s'intéresse aux *contenus de connaissance* organisés par des processus scientifiques (les disciplines) ou pragmatiques (les activités de travail). La recherche consiste à étudier la compatibilité cognitive entre les connaissances des concepteurs de systèmes, celles des utilisateurs et les connaissances liées à l'utilisation même des dispositifs. Un autre champ de recherche en développement concerne la *didactique disciplinaire ou professionnelle*, ainsi que l'expertise et l'acquisition des compétences expertes. Dans ce dernier cas, on étudie les processus de formation de connaissances publiques et explicites, mais aussi la manière dont se développent les "connaissances en acte" et les savoirs implicites ou privés.

#### 4 - INDUSTRIES DE LA LANGUE

Les industries de la langue regroupent diverses professions qui se fondent sur l'exploitation du savoir-faire lié à la langue. Il s'agit des métiers traditionnels du langage (traduction, etc.), mais aussi d'un ensemble d'activités nouvelles : gestion en ligne de documentations techniques, interrogation de bases de données, commande de robots ou de processus industriels, assistance à l'utilisation de machines. Dans l'expression "industrie de la langue", le mot "industrie" indique la recherche d'une *automatisation* mise en œuvre dans le but d'accroître la productivité. Le fait que les composants linguistiques soient intégrés dans différents secteurs de l'industrie (génération de textes, synthèse de la parole, correction orthographique, bureautique, etc.) justifie pleinement à leur propos le qualificatif de "techniques diffusantes".

Le développement de la recherche sur la plupart des thèmes évoqués dans cette section est de nature à produire des *transferts de technologie* significatifs, dont l'ensemble du corps social est appelé à bénéficier (industrie, services, éducation). Ceci est vrai des travaux menés en génie linguistique, mais aussi des travaux tournés vers l'acquisition et la transmission des connaissances assistées par ordinateur.



# PROBLEMES DE MODÉLISATION

Les problèmes de *symbolisation* rencontrés par les sciences de la cognition et de la communication conduisent au développement de nouveaux modèles mathématiques, physiques et logiques. Ils sont également à l'origine du développement des recherches en *linguistique cognitive*. Dans cet esprit se réalisent également d'intéressantes confrontations des *modélisations de la communication* menées dans différentes disciplines (psychologie, anthropologie, économie).

## 1 - LOGIQUE

Traditionnellement, la *logique* est associée à l'idée d'une approche formelle et déductive. L'insistance sur la forme par opposition au contenu reflète une interaction purement externe entre les éléments du discours. Dans la période récente, la crise des fondements des mathématiques a constitué un moment important du développement de la logique Formelle. L'*informatique* a également renouvelé la problématique logique en rappelant à la logique qu'elle ne s'appliquait pas uniquement au raisonnement mathématique. Ainsi, au caractère cumulatif et statique d'une bibliothèque de théorèmes s'oppose la nature *dynamique* et *révisable* d'une base de données dont la gestion rigoureuse requiert une approche logique autonome.

Un élargissement du cadre logique est également perceptible dans les travaux actuels sur le traitement des *informations négatives, incomplètes ou incertaines*. Ces problèmes importants et difficiles demandent une réponse qui passe par une remise en cause des cadres syntaxiques et sémantiques traditionnels. Ainsi, la logique classique nous a légué l'idée de valeur de vérité, la dualité démonstration-modèles, une liste de connecteurs intangible. L'élargissement nécessaire de la logique tend à bouleverser ces points de repère.

Ces considérations mènent à envisager de traiter le problème de la *rigueur informelle*. Ainsi rend-on compte aujourd'hui du raisonnement contrefactuel par la sémantique des mondes possibles. Les bases de données, avec leurs problèmes d'informations négatives, de mise à jour et de déduction, constituent un domaine privilégié d'étude et de mise au point des nouvelles idées logiques.

Dans une perspective d'extension, rapproche logique semble prête aujourd'hui à embrasser des problèmes plus ambitieux - mais aussi plus risqués -, comme l'*aspect logique des systèmes experts*. Les interactions de la logique ne se limitent d'ailleurs pas à l'informatique et à l'intelligence artificielle. Elles s'étendent aussi aux sciences humaines et sociales. Même si les protocoles de vérification y sont par nature moins aigus, la logique continue à offrir des possibilités de formalisation, qui n'excluent pas des retombées conceptuelles sur la logique elle-même.

## 2 - SCIENCES DU LANGAGE

Le langage, composante majeure de la communication chez l'homme, continue de constituer un carrefour privilégié des sciences cognitives. En dépit de l'importance des enjeux, il faut regretter ici la modestie de l'investissement des chercheurs pour les pathologies de la communication.

Deux grandes perspectives peuvent être identifiées :

- Un premier type de recherches porte sur le langage comme *activité symbolique* inscrite dans un environnement impliquant les *systèmes perceptifs de l'individu* et les *contextes d'interaction sociale*. Cette perspective est en particulier celle des courants consacrés à l'élaboration des grammaires cognitives.

- On trouve, d'autre part, des travaux visant à l'identification des *propriétés formalisables des langues naturelles* en vue de l'implémentation en machine (recherches sur la complexité syntaxique

et sémantique des langages, grammaires formelles et automates, logiques non standard, modèles mathématiques des opérations, catégorisations et schématisations linguistiques).

Ces deux approches correspondent à une double perspective d'intégration des sciences du langage aux sciences cognitives :

- la perspective d'une analyse des *représentations cognitives et socio-cognitives* impliquées dans les rapports entre langage, perception et action;

- la perspective de la *modélisation de processus* (construction et représentation des connaissances, architectures, modèles computo-symboliques ou connexionnistes).

Ces deux perspectives se rejoignent dans nombre de développements industriels dont les enjeux économiques sont évidents : systèmes experts, banques de données, dictionnaires, hypertextes, communication homme-machine, synthèse de la parole.

### 3 - RÉSEAUX DE NEURONES FORMELS

La recherche en neurosciences dans notre pays a atteint un niveau international et la plupart des grands domaines sont représentés, en particulier dans le champ des neurosciences cognitives. Un certain nombre de coopérations pluridisciplinaires sont engagées, en particulier dans le domaine des *réseaux de neurones* (fruit d'une rencontre entre la *biologie*, la *cybernétique* et l'*informatique*). Toutefois, on peut se demander si cette pluridisciplinarité n'est pas parfois plus abstraite que réelle. La nécessité de formalismes nouveaux s'impose aux neurosciences cognitives. En particulier, la notion de modèle doit être plus clairement définie, avec l'obligation de prendre sa source dans les données expérimentales et d'aboutir à la formulation d'hypothèses elles-mêmes vérifiables au plan expérimental

Les recherches sur les réseaux de neurones offrent des perspectives de développement prometteuses et suggèrent des actions de développement pertinentes dans la conjoncture actuelle. Ces études attestent de la nécessité d'échanges soutenus entre *neurosciences* et *formalismes adaptés*.

L'étude des systèmes naturels est bien sur primordiale pour comprendre l'effectivité de traitements performants en temps réel. Cette étude doit rester "au plus près" de la complexité de la structure et des fonctions du neurone, de la complexité des types de signaux véhiculés, des différentes variations d'interactions synaptiques. Néanmoins, compte tenu des contraintes expérimentales liées à l'observation du système nerveux et des réseaux neuronaux réels, la modélisation et le développement de réseaux de neurones formels demeurent les moyens les plus appropriés pour tester des hypothèses nouvelles.

Les progrès dans l'élaboration de réseaux de neurones formels sont donc tributaires du développement *d'outils théoriques fondamentaux*. Citons la mécanique statistique, ouverte sur l'étude des systèmes dynamiques non linéaires et complexes; l'optimisation non linéaire, particulièrement bien adaptée à la modélisation des algorithmes d'apprentissage; le filtrage non linéaire et le traitement de signaux évolutifs.

Plusieurs aspects du fonctionnement cognitif font l'objet de convergences significatives :

- *La vision*. Les systèmes de vision naturelle mobilisent de nombreux composants fonctionnant en parallèle. La modélisation en termes de réseaux de neurones formels s'avère ici précieuse pour les différents niveaux d'analyse portant sur le codage initial, la détection du mouvement, la perception des couleurs, la vision stéréoscopique, les phénomènes de segmentation.

- *La proprioception*. Comprendre le fonctionnement des structures motrices implique un effort de modélisation des coordinations sensori-motrices. Ici, une coopération interdisciplinaire s'avère né-

cessaire entre mathématiciens, physiciens et biologistes afin d'assurer une convergence des travaux, comme ce fut le cas, notamment, à propos des modèles du cervelet. Les applications sont d'un intérêt scientifique et économique considérable (par exemple, la mise au point du contrôle des bras manipulateurs de robots).

- *L'audition et la synthèse de la parole*, La mise au point de modèles de la fonction auditive s'avère précieuse en vue de rendre plus efficace la reconnaissance de la parole. Les difficultés principales proviennent de ce que Ton connaît encore mal l'activité des neurones impliqués dans le système de perception auditive. En synthèse de la parole, certaines réalisations constituent des avancées permettant de mieux tester l'application des réseaux de neurones formels.

- *l'action, le contrôle moteur et la planification*. Les problèmes intéressant au premier chef la recherche actuelle concernent l'organisation de l'activité manipulative au niveau neuronal, la fusion des signaux sensoriels, l'intégration des informations sensorielles dans une structure distribuée. En ce qui concerne la planification du mouvement, les travaux se concentrent sur la nature du codage neuronal, sur l'organisation des séquences temporelles et sur les processus de mémorisation.

## 4 - LES APPORTS DE LA PHYSIQUE STATISTIQUE

Il faut relever ici les apports de la *physique* aux sciences de la cognition, en particulier dans la *théorie* et la *modélisation des réseaux de neurones*. Par la complexité de ses structures et de ses fonctions, par ses capacités d'apprentissage et de mémoire, le système nerveux (comme d'ailleurs le système immunitaire) offre un vaste champ à la modélisation théorique. La théorie des réseaux de neurones constitue un carrefour d'idées en provenance des mathématiques, de la physique, de l'informatique, de la neurobiologie, de la psychologie.

Au cours de la dernière décennie, la physique statistique des systèmes désordonnés a fait une entrée remarquée dans ce champ interdisciplinaire. En vérité, l'impact est réciproque. Si les approches physiques ont contribué au renouvellement de l'étude des réseaux en couches sans rétroaction, du type perceptron (réseaux servant de modèles pour les aires primaires, impliquées dans le pré-traitement des données sensorielles), elles ont surtout permis l'élaboration de la notion de *calcul par attracteur* (servant de métaphore pour aborder la compréhension des aires associatives).

En retour, l'étude des réseaux de neurones a ouvert un nouvel horizon en physique statistique, en direction des *systèmes à interactions dissymétriques*, sans fonction énergie au sens usuel. Ce double impact est bien le signe de l'émergence d'un nouveau domaine du savoir. A ce jour, il paraît encore trop tôt pour juger si les récents progrès expérimentaux dans l'étude des "assemblées oscillantes" pourront être interprétés comme l'extension de domaines théoriques existants ou s'ils vont nécessiter de nouveaux remaniements conceptuels.

## 5 - LA COGNITION DISTRIBUÉE

Toujours au chapitre de la modélisation, un thème en émergence est celui de la *cognition distribuée*, c'est-à-dire la cognition attribuable à une *collectivité d'agents individuels*. Cette notion est instantiée dans des registres très divers : systèmes informatiques répartis, collectivités linguistiques, ensembles d'agents économiques.

L'étude des propriétés formelles de la cognition distribuée permet de mettre au jour des *isomorphismes* très suggestifs entre des situations et des problèmes matériellement fort divers : le partage des connaissances dans une collectivité de processeurs informatiques parallèles, l'état d'une population de locuteurs en accord sur les référents de leurs expressions, la convergence des estimations parmi un ensemble d'agents économiques. La description de ces isomorphismes (ou plus exactement



des structures abstraites qui les sous-tendent) est à l'origine de formalismes nouveaux, conçus pour représenter les univers de discours relevant des sciences sociales.

## 6 - COGNITION ET ORGANISATION

Un autre thème en émergence est celui des rapports entre *cognition* et *organisation*. Cette approche conduit à spécifier trois registres : la cognition naturelle, la cognition artificielle, la cognition organisationnelle. Le domaine circonscrit est nécessairement interdisciplinaire et implique des conceptualisations nouvelles sur les formes collectives du *raisonnement* et de la *prise de décision*.

Considérons les agents d'un système économique, Il s'agit tout d'abord de caractériser les représentations mentales que ceux-ci ont de leur environnement (et notamment des autres acteurs impliqués dans cet environnement). Ici, la *théorie des jeux* et, plus généralement, les *théories normatives de la décision* sont des références pertinentes, dans la mesure où le chercheur s'intéresse aux attentes que certains agents ont à propos des actions d'autres agents. Cet aspect conduit à développer une *théorie de la complexité* et à considérer la manière dont peuvent intervenir à la fois des méthodes de recherche heuristique et des méthodes basées sur les connaissances pour gérer au mieux la complexité des situations. Enfin, dans un système économique, il importe d'apprécier les capacités qu'ont les agents de s'adapter à des situations nouvelles, ce qui conduit à donner une importance particulière aux processus d'*apprentissage* et aux phénomènes de *co-adaptation*.

La modélisation (éventuellement informatisée) des sociétés et des organisations complexes permet alors de simuler le comportement effectif des individus dans leur environnement. La *modélisation multi-agents* s'inspire des travaux effectués dans le cadre de l'intelligence artificielle distribuée et de la "vie artificielle". Elle met également l'accent sur les

interactions existant entre les individus et permet de travailler sur un modèle étiologique en considérant l'ordinateur comme un laboratoire d'expérience dans lequel il est possible de construire des sociétés artificielles qui évoluent sous la pression des actions individuelles. Enfin, cette réflexion générale sur les rapports entre cognition et organisation renouvelle la modélisation des processus d'*auto-organisation*. La synergie bien attestée entre les processus cognitifs et les processus d'autonomisation se généralise clairement au domaine des organisations sociales.

## RECOMMANDATIONS

Les thèmes de recherche relevant des sciences de la cognition et de la communication se situent, par définition, à la frontière de plusieurs disciplines. Cette situation est parfois source de difficultés et d'ambiguïtés. La conduite au quotidien de travaux réalisés dans un véritable contexte interdisciplinaire n'est pas toujours aisée et demande de réels efforts de la part des divers partenaires. C'est pourtant de ces travaux qu'il faut attendre des percées significatives, surtout dans un contexte international déjà très productif et bien organisé.

Plutôt que de récapituler ici les nombreuses thématiques émergentes relevées dans ce rapport, nous nous bornerons à synthétiser plusieurs types de "*carre/ours interdisciplinaires*" qu'il apparaît important de promouvoir tant au plan des intégrations méthodologiques qu'à celui des enjeux sociaux et économiques impliqués :

- *Etude des grandes Jonctions contributives à l'intelligence et aux comportements adaptatifs* : dispositifs neurosensoriels (vision, audition, olfaction, etc.), motricité, planification de l'action, raisonnements et résolution de problèmes, apprentissage et mémoire; cette approche inclut l'*ontogenèse des fonctions* et l'étude de leurs *interactions* dans les activités complexes,

- *Communication homme-machine* : interactions ergonomiques, traitements symboliques, nouveaux dispositifs multimodaux.

- *Modélisation et nouveaux outils théoriques* : logiques, réseaux neuronaux, traitements formels et cognitifs du langage, cognition distribuée, cognition coopérative, organisations complexes, théorisations sémantiques et comparaisons inter-langues et inter-codes.

- *Approches cognitives des pathologies et déficiences* : bases neuronales, lésions et réparations, déficits biochimiques, perturbations dans la communication.

Dans ce paysage multi-thématique, il nous paraît plus que jamais indispensable de continuer de *susciter les recherches* en sciences cognitives, d'identifier avec soin les projets et les actions en cours, de les encourager et de les soutenir. Il existe une richesse et une variété de compétences dans notre communauté, prêtes à œuvrer pour répondre à des enjeux scientifiques, sociaux et industriels très importants. La mission des organismes susceptibles de soutenir la recherche dans ces domaines consiste, en somme, à activer un potentiel.

En général, il s'agit de mettre en œuvre des moyens destinés à favoriser les interactions en profondeur. Un premier objectif consiste à *protéger l'interdisciplinarité* et à *continuer de la susciter*. Il s'agit également d'apporter des soutiens qui encouragent les chercheurs engagés dans une démarche pluridisciplinaire à mettre en œuvre des entreprises de réelle interdisciplinarité.

Un second impératif est d'encourager des *structures* qui permettent aux chercheurs de se côtoyer, de découvrir leurs problématiques respectives et d'engager des coopérations. Sans doute est-il indispensable, compte tenu du caractère encore non stabilisé de ce domaine de recherche, de favoriser des structures suffisamment souples pour permettre que se réalisent des évolutions dont la prédictibilité n'est pas totale. C'est le cas des *réseaux* (de type GDR, PRC, Réseaux du Programme Co-

gnosciences), Le développement de ce type de structures est encore inégal selon les départements du CNRS. Il faudrait encourager l'évolution de tels réseaux, notamment par leur articulation avec des réseaux plus étendus (en particulier, européens). La vie des réseaux doit enfin être complétée par des *actions plus spécifiques* sur des domaines précis (par des appels d'offres thématiquement ciblés), avec un suivi effectif, ce qui pose bien entendu le problème de l'évaluation.

D'autres formes d'actions favorisant le développement des échanges et des rencontres entre chercheurs sont à considérer, en particulier les actions *de formation*. Nous pensons d'abord aux actions de type écoles d'été ou ateliers, avec des degrés divers de focalisation thématique, mais également aux formations doctorales et aux formations post-doctorales dans des laboratoires étrangers. En outre, il est souhaitable que les institutions de soutien à la recherche reconnaissent comme partenaires les groupes, associations et sociétés savantes qui œuvrent au développement des sciences cognitives dans un esprit réellement interdisciplinaire.

Le CNRS devrait encourager et aider à la mise en place de "*centres*" ou "*maisons de la cognition*", lieux institutionnels de rencontre, de documentation et d'accueil de chercheurs étrangers. Il serait également important que la visibilité de l'action du CNRS en faveur des sciences de la cognition soit assurée par la création d'*instituts pluridisciplinaires* hébergeant des équipes sur des durées et des programmes déterminés. La mise en œuvre de tels projets nécessiterait vraisemblablement le concours des régions accueillant ces instituts. Enfin, en liaison ou non avec ces initiatives, il serait important que le CNRS, avec d'autres organismes scientifiques, facilite la mise en place d'*équipements lourds ou mi-lourds* indispensables à la poursuite de projets d'ampleur nationale (tomographie par émission de positons, magnétoencéphalographie).

La poursuite des programmes CNRS et MRT/MRE et la poursuite d'efforts en vue de leur articulation fonctionnelle constituent enfin les

conditions d'une bonne inscription des sciences de la cognition dans le paysage national et européen,

Le CNRS, enfin, devrait être attentif au problème suivant. Pour atteindre l'interdisciplinarité visée par les projets de sciences cognitives, il est impératif que soient créées des *structures d'évaluation* appropriées. L'évaluation des chercheurs et des équipes pluridisciplinaires est difficile et demande de faire appel à des experts "extérieurs" (autres sections du Comité National, hors sections, autres organismes, experts étrangers). Malgré la refonte récente du Comité National, il est clair que la composition actuelle de la majorité des sections ne leur donne pas toujours compétence pour procéder à l'évaluation de tels travaux interdisciplinaires et, par voie de conséquence, rend plus difficile le recrutement de chercheurs sur des profils non classiques.

On notera à ce propos que parmi les sections les plus concernées par les sciences cognitives, deux d'entre elles seulement relèvent de deux départements scientifiques du CNRS : SDV et SHS pour la section 29 (*Fonctions mentales. Neuro-*

*sciences intégratives. Comportements*); SHS et SP1 pour la section 34 (*Représentations. Langages. Communication*). Or il est évident que c'est souvent de plus de deux départements que relèvent certains programmes de recherche en sciences cognitives.

En résumé, notre message est que le CNRS, qui a su enclencher des mécanismes institutionnels nouveaux, dans un contexte où les sciences de la cognition attendaient une telle initiative, doit poursuivre sa mission, en mesurant l'importance de l'enjeu et en tenant compte de la forte poussée venant de la recherche d'outre-Atlantique et des autres pays européens.

**Michel Denis**

*Président du groupe 03*

*avec la collaboration de*

*Joseph Marioni*

*Claudine Mosson*

*Georges Vignaux*



# 04

## UNIVERS, NOYAUX, PARTICULES

### INTRODUCTION GENERALE

Rassembler dans un même thème la physique des systèmes dont les dimensions sont aux extrêmes de l'échelle des dimensions peut, sembler téméraire ou paradoxal. En effet, entre les particules ( $10^{-15}$  m) et les amas de galaxies (1023 m), les phénomènes physiques paraissent relever d'un ordre bien différent. Pourtant, en plus de leurs problématiques propres qui représentent le cœur de chaque discipline, les domaines de la physique subatomique et de l'astrophysique ont eu des interactions croissantes qui n'ont pas cessé de nous fasciner.

Cette connexion entre les mondes de l'infiniment petit et de l'infiniment grand est très profonde et relève de la nature même de l'univers en expansion. Les conditions extrêmes de température qui régnaient au début de l'expansion (Big Bang) sont recréées petit à petit grâce aux accélérateurs de particules d'énergie de plus en plus élevée : les expériences de physique des particules et de physique nucléaire, complètement contrôlées par le physicien, permettent donc d'obtenir des résultats qui peuvent être comparés aux observations de l'astronome. L'interaction entre ces deux sciences de l'extrême est un moteur très performant pour faire progresser les connaissances sur l'univers.

Un autre aspect rassemble ces deux domaines : pour être explorés efficacement, ils demandent la mise en oeuvre de moyens importants et coûteux. D'une part, la montée en énergie des accélérateurs est inévitable pour accéder aux petites distances caractéristiques des particules les plus fondamentales, et des détecteurs complexes sont nécessaires pour l'expérimentation. D'autre part, l'observation de l'univers dans la diversité de ses différents rayonnements oblige à utiliser des télescopes d'une résolution de plus en plus grande et une expérimentation dans l'espace pour s'affranchir de l'atmosphère terrestre. Dans les deux cas, le maintien d'objectifs compétitifs et potentiellement riches de découvertes a demandé une organisation spécifique au niveau national (instituts IN2P3 et INSU au CNRS, département DAPNIA au CEA) dans une approche dominée par la collaboration internationale, bien développée au niveau européen et dont le CERN est un modèle. Cette structure a fait la preuve de son efficacité qui a permis aux équipes françaises de jouer un rôle important et souvent dominant.

Le présent chapitre passera en revue les thèmes les plus marquants et les évolutions dans les domaines qui s'intéressent à des systèmes de dimension croissante : à l'échelon pour l'instant le plus élémentaire, les quarks et les leptons; puis les hadrons; les noyaux; et enfin, après avoir enjambé la matière atomique, moléculaire et les planètes, l'univers tout entier.

Nous avons tenu à présenter ensuite des thèmes en émergence qui reflètent bien le caractère interdisciplinaire qui est une force de ce domaine de la science.

## QUARKS ET LEPTONS

### 1 - INTRODUCTION

A l'échelle des constituants ultimes de la matière, il devient possible d'étudier les interactions les plus fondamentales. C'est l'objet<sup>1</sup> de la physique des particules qui, après avoir mis en évidence le niveau de structure de la matière représenté par les quarks et les leptons, s'attache maintenant à mieux comprendre leurs interactions dans le cadre de théories unificatrices découlant de principes d'invariance de jauge.

### 2 - LE MODÈLE STANDARD DES PARTICULES

Les particules élémentaires qui constituent la matière se répartissent en trois familles identiques, chacune composée d'une paire de leptons (comme l'électron et son neutrino) et d'une paire de quarks (comme les quarks u et d qui forment le proton et le neutron), et de leurs antiparticules. Si les 6 leptons (électron, muon et tau et leur trois neutrinos associés) ont été observés, seuls 5 quarks ont été (u, d, s, c et b), mais l'existence du sixième quark, le "top", est requise pour la cohérence de la théorie. Ces particules ont toutes un spin 1/2 (moment cinétique intrinsèque) (1) et sont reliées par 4 types d'interaction. Toutes sont soumises à l'interaction

gravitationnelle, qui n'est pas intégrée dans le Modèle Standard et qui est généralement négligeable en physique des particules, ainsi qu'à l'interaction faible qui est difficilement observable en présence d'une des deux autres "forces" : l'interaction électromagnétique relie les particules chargées (rappelons que le neutrino est neutre et que les quarks u et d portent une charge égale à -2/3 et 1/3 celle de l'électron), tandis que l'interaction forte n'agit que sur les quarks ou sur les particules composées de quarks qu'on nomme hadrons (comme le proton). Cette charge "forte" que possèdent les quarks existe en 3 variétés qu'on appelle de manière imagée les "couleurs" : il y a donc en fait 3 quarks u, 3 quarks d, etc.

Les interactions électromagnétique, faible et forte se décrivent dans le même cadre mathématique, celui des "théories de jauge", et se manifestent lors de l'échange d'une particule de spin 1 (un boson intermédiaire) entre 2 particules élémentaires. Ces bosons sont le photon pour l'électromagnétisme, les  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  pour l'interaction faible, et les 8 "gluons" pour l'interaction forte. L'électromagnétisme est très bien compris depuis les années 40, l'accord de la théorie de l'Electrodynamique quantique (QED) avec les expériences étant un des meilleurs de toute la physique. C'est pourquoi elle a servi de modèle pour les autres interactions.

L'étude de l'interaction forte (la Chromodynamique quantique, ou QCD) est compliquée par le fait que les gluons sont "colorés" et peuvent donc échanger des gluons entre eux. Ceci augmente considérablement l'intensité de l'interaction à grande distance, ce qui a pour effet d'interdire à une particule "colorée" de s'éloigner des autres : on n'a jamais observé de quark ou de gluon à l'état libre, mais des combinaisons incolores sont permises, telles les baryons (3 quarks, un de chaque "couleur") ou les mésons (un quark et un antiquark de "couleurs" opposées). Le comportement de la QCD à basse énergie est mal maîtrisé mathématiquement et est décrit dans la section suivante. Par contre, à haute énergie (donc à courte distance), l'intensité de l'interaction forte décroît et l'on sait prédire précisément le comportement de processus de diffu-

(1) Les valeurs pour le spin sont indiquées en unités de  $\hbar = h/2\pi$ .

sion "dure", qui donnent dans l'état final des quarks et des gluons que Ton détecte sous forme de jets de hadrons (par un processus d'"habillage" des quarks et des gluons). Il reste cependant encore beaucoup de travail tant expérimental que théorique pour établir la QCD aussi fermement que les autres interactions.

L'interaction faible pose des problèmes différents. D'une part, elle viole la parité (symétrie par réflexion de l'espace) : elle n'agit entre l'électron et son neutrino que s'ils sont polarisés "à gauche". D'autre part, la symétrie de jauge est brisée : les deux particules de chaque paire qu'elle relie  $e^+$  et  $e^-$ , quark  $u$  et  $d$ ,...) ont des masses et des charges électriques différentes, et les bosons intermédiaires  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  ont une masse, contrairement au photon ou aux gluons. Pour briser la symétrie de jauge sans rendre la théorie mathématiquement incohérente, on utilise une nouvelle particule, un boson de spin 0 appelé boson de Higgs, qui permet de plus de donner une masse aux quarks et aux leptons. Une avancée fondamentale dans les années 70 est que l'électromagnétisme et l'interaction faible ne sont que deux manifestations différentes, après brisure de la symétrie, d'une interaction globale "électrofaible", de nos jours lésée à mieux que 1 %.

### 3 - AU-DELÀ DU MODÈLE STANDARD

Le Modèle Standard regroupant la QCD et l'interaction électrofaible est remarquablement vérifié, mais plusieurs points restent obscurs. Le regroupement des particules en trois familles similaires n'est pas du tout compris. L'échelle des masses d'une famille à l'autre n'est pas mieux comprise qu'à l'intérieur de chaque famille: en particulier la découverte d'une masse non-nulle du neutrino aurait d'énormes conséquences, aussi bien pour la physique des particules que pour l'astrophysique ou la cosmologie. Mais le problème fondamental à l'heure actuelle est celui de l'origine de la brisure de la symétrie électrofaible. Le boson de Higgs n'a pas été observé, ce qui n'est pas anormal car rien n'interdit qu'il, puisse être très lourd. Comme c'est

la pièce la plus insolite du modèle standard, sa découverte serait une confirmation précieuse du schéma de brisure. Cependant, le "Higgs" n'est pas forcément élémentaire : il pourrait être composé d'une paire quark-antiquark d'un type nouveau reliés par une nouvelle interaction (la "technicouleur"). Mais en cas de masse très élevée, tous les modèles prévoient une interaction intense entre "Higgs" et bosons  $W$  et  $Z$ , qui ne pourra être étudiée qu'avec la nouvelle génération d'accélérateurs en développement. Les intensités de l'interaction forte, faible et électromagnétique tendent vers une valeur comparable à haute énergie, de l'ordre de  $10^{14}$  à  $10^{17}$  GeV, totalement inaccessible avec un accélérateur(2). Cela rend plausible une unification de ces trois interactions à travers une grande symétrie de jauge, brisée à très haute énergie, comme la symétrie électrofaible l'est à quelques centaines de GeV. Cette grande unification permettrait la désintégration de quarks en leptons, et à l'échelle "macroscopique" du proton en positon et photons. La stabilité du proton mesurée dans des expériences souterraines exclut le modèle d'unification le plus simple, mais rien n'empêche que la réalité soit un peu plus compliquée, auquel cas les limites expérimentales ne permettent pas encore de trancher. En particulier une nouvelle symétrie, la supersymétrie, aurait plusieurs autres avantages.

La supersymétrie introduit une symétrie entre les bosons (de spin 0, 1 ou 2) et les fermions (de spin 1/2 ou 3/2), non pas entre les particules existantes comme le fait la grande unification, mais en associant à chaque particule un partenaire supersymétrique de spin différent. Le spin est une quantité liée à l'espace-temps, et la supersymétrie serait ainsi reliée à la gravitation. Avec la supersymétrie, on peut expliquer mathématiquement comment peuvent coexister des échelles d'énergie si différentes pour l'unification électrofaible ou la grande unification. Ceci est vrai si la supersymétrie était une symétrie exacte (ce qui n'est pas le cas, car les masses des partenaires supersymétriques sont élevées,

(2) L'unité d'énergie 1 GeV =  $10^9$  eV correspond approximativement à l'énergie de masse d'un proton.



puisque'on ne les a jamais observés), ou si la brisure a lieu à relativement basse énergie (quelques centaines de GeV), rendant prochainement accessibles (si elles existent) ces nouvelles particules.

La construction d'une théorie quantique de la gravitation progresse difficilement. La gravitation supersymétrique (supergravité) a suscité beaucoup d'espoir, avant de laisser place à la théorie des supercordes dans laquelle les particules ne sont plus ponctuelles mais ont une extension spatiale, comme de petites cordes. Ces théories ont l'inconvénient de décrire un univers à très haute énergie ( $10^{19}$  GeV), possédant 9, 10 ou 25 dimensions spatiales, et leur réduction à basse énergie à nos 3 dimensions habituelles comporte une grande part d'arbitraire. Par contre, leur inhabituelle complexité mathématique suscite un énorme intérêt de la part des mathématiciens, et elles ont permis de développer de nombreux outils en physique statistique (théories conformes à 2 dimensions).

#### 4 - DÉCOUVERTES AUPRES DES COLLISIONNEURS HADRONIQUES

Pendant les années 80, le collisionneur protons-antiprotons du CERN, avec une énergie de 630 GeV dans le centre de masse, a fourni des résultats expérimentaux d'une grande richesse, en particulier la découverte des bosons intermédiaires, W et Z<sup>0</sup>, médiateurs de l'interaction faible, par les expériences UA1 et UA2. Le collisionneur du CERN et ses expériences ont été améliorés de 1985 à 1987, et des résultats expérimentaux importants ont été obtenus de 1988 à 1991 par UA2 et UA4 (deux expériences avec une forte participation de physiciens français), date à laquelle la machine a été arrêtée afin de dégager les moyens nécessaires pour les nouvelles machines LEP et HERA. Les recherches les plus prometteuses pour découvrir des particules très massives, comme le quark top ou de nouveaux bosons de jauge, se déroulent désormais au TeVatron, collisionneur proton-antiproton d'une énergie de 1 800 GeV, situé à Fermilab près de Chicago. Le redémarrage en 92

des prises de données devrait permettre de découvrir d'ici un an le top si Ton se fie aux mesures indirectes obtenues à LEP

En Europe, les collisionneurs hadroniques reprendront le flambeau après Tan 2000, date approximative à laquelle pourrait démarrer le collisionneur proton-proton LHC (*Large Hadron Collider*) à une énergie de 15 400 GeV, construit dans le tunnel du LEP. Le LHC est également prévu comme un collisionneur d'ions lourds (collisions plomb-plomb à 6 300 GeV par nucléon) et, plus tard, comme un collisionneur électrons-protons en utilisant les faisceaux de LEP. Comme le collisionneur SSC au Texas, le LHC a pour but principal la découverte du boson de Higgs, chaînon manquant du Modèle Standard, mais on espère aussi y découvrir un nouveau domaine de physique.

La construction technique d'une telle machine, avec un millier d'aimants supra-conducteurs produisant un champ magnétique très intense de 10 Tesla, nécessite une collaboration très étroite avec les industries de pointe des différents pays européens. La conception et la construction d'une expérience de physique proton-proton à haute luminosité au LHC doit tenir compte en particulier des contraintes imposées à l'électronique et aux détecteurs par le très haut taux de collisions (de l'ordre de  $10^9$  Hz) et le niveau très élevé de radiation qui en découle. Il s'agit donc d'une tâche ardue et de longue haleine, qui nécessite une phase préliminaire de recherche et développement commencée en 1990 et à laquelle participent de nombreux physiciens français. Citons comme exemples les travaux sur la calorimétrie avec fibres scintillantes ou avec argon liquide, la détection des traces chargées avec détecteurs en silicium, les recherches dans le domaine de l'électronique résistant aux fortes doses de rayonnement et de l'acquisition de données ultrarapide.

Après les réunions préparatoires de 1984, 1987 et 1990, ce programme de R&D va permettre de faire des propositions concrètes d'expériences à la fin 92, dans lesquelles le CNRS et le CEA sont parties prenantes.

## 5 - TESTS DE PRÉCISION DU MODÈLE STANDARD

La physique de précision des grands collisionneurs  $e^+e^-$  a derrière elle une tradition déjà longue. Après PETRA en Allemagne, et plus récemment KEK au Japon, le LEP est entré en service au CERN près de Genève le 14 juillet 1989. Installé dans un tunnel de 27 km de circonférence, à 100 mètres de profondeur, il a fallu environ cinq ans pour le construire. L'énergie actuelle d'une cinquantaine de GeV par faisceau sera doublée pour la phase dite LEP200 d'ici deux ans, grâce à l'adjonction de cavités supraconductrices.

Quatre expériences d'environ 500 physiciens chacune étudient la physique à LEP : ALEPH, DELPHI, L3, OPAL. Chacune, et tout particulièrement les deux premières, bénéficient d'une très forte participation française ; le CEA et plusieurs laboratoires de l'IN2P3 y sont impliqués à tous les niveaux par les contributions des physiciens et des équipes techniques français, tant dans la construction des détecteurs que dans l'élaboration des logiciels informatiques d'acquisition et de traitement des données.

A cette phase de construction a succédé, depuis trois ans maintenant, l'ère de l'analyse des résultats, qui sont d'une clarté supérieure à ce que Ton attendait. Le nombre de  $Z^0$  produits augmente rapidement, passant de 60 000 en 89 à plus de 4 millions fin 92, et permet des tests très poussés du Modèle Standard. La grande majorité de ces  $Z^0$  se désintègrent en une paire  $q\bar{q}$ , donnant souvent lieu à deux jets de particules de directions opposées dans le détecteur et permettant des tests de QCD. Les 10 % se désintégrant en paires de leptons ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ ,  $\tau^+\tau^-$ ) autorisent l'étude du secteur électrofaible avec une grande précision. Les progrès que le LEP a permis méritent d'être passés rapidement en revue :

- la masse du  $Z^0$ , paramètre important du Modèle Standard a été déterminée avec une grande précision limitée désormais par la connaissance de

l'énergie des faisceaux :  $M(Z^0) = 91,174 \pm 0.020$  GeV;

- le nombre de neutrinos existants, déterminé par la durée de vie du  $Z^0$ , est de  $2,99 \pm 0.05$ . Ce résultat fixe donc à 3 le nombre de familles, en accord avec les prédictions de la nucléosynthèse dans l'univers primordial;

- ces trois familles se comportent de manière identique : cette "universalité" est vérifiée à LEP à 1 % près. La question d'une sous-structure des quarks et des leptons, dont les familles ne seraient qu'une manifestation, reste entière;

- une vérification fine du Modèle Standard peut, être effectuée lors d'une désintégration de  $Z^0$  car la paire de quarks ou de leptons n'est pas produite de manière isotrope, en raison de la non-conservation de la parité. L'asymétrie prédite par le Modèle Standard est en parfait accord avec les résultats des 4 expériences, et ce dans toutes les combinaisons fermion-antifermion étudiées;

- la chromodynamique quantique est testée avec une précision moindre (- 10 %) que l'interaction électrofaible - à cause des phénomènes de confinement des quarks que nous ne savons pas bien calculer -, mais l'accord observé est satisfaisant;

- la physique du lepton  $\tau$  et du quark  $b$  est un sujet très riche et avec un grand potentiel de découvertes tant à l'intérieur qu'au-delà du Modèle Standard;

- recherche de nouvelles particules : LEP a prouvé que le Higgs du Modèle Standard a une masse supérieure à 57 GeV. Le quark  $t$  est inaccessible sauf peut-être à LEP200, puisque les mesures indirectes dans le cadre strict du Modèle Standard le situent aux alentours de  $150 \pm 30$  GeV. Les limites sur les mesures des particules supersymétriques ont été repoussées vers 50 GeV environ. Avec l'accumulation du nombre de désintégrations de  $Z^0$  la recherche de phénomènes rares continue cependant avec acharnement.

Après cette avalanche de  $Z^0$  qui devrait durer jusqu'en 1994, LEP montera en énergie de manière à pouvoir produire des paires  $W^+W^-$ . Les recherches de nouvelles particules continueront de plus belle, et un nouveau pan du Modèle Standard y sera testé : l'interaction directe entre photon et boson W. La masse du W sera mesurée avec grande précision, et ses produits de désintégration étudiés et comparés aux prédictions. Si le top ou le Higgs se révélaient avoir une masse autour de 100-120 GeV, on pourrait, en introduisant dans le LEP des cavités supraconductrices supplémentaires, atteindre cette énergie pour chaque faisceau, et donc les produire directement par annihilation  $e^+e^-$ . Une autre solution, d'après les premières études en cours, serait de réaliser un accélérateur linéaire  $e^+e^-$  de 250 GeV par faisceau, qui permettrait d'étudier aisément le top et le Higgs. Ce projet est cependant à assez long terme, car il nécessite encore beaucoup d'études de recherche et de développement dans lesquelles la France est bien engagée, mais à un niveau encore insuffisant.

## 6 - LA STRUCTURE DU PROTON À TRES PETITE ÉCHELLE

Le fer de lance du CERN a longtemps été le grand synchrotron à proton (SPS) qui accélère des protons à 400 GeV. Cette machine a été transformée en collisionneur proton-antiproton, et maintenant en "injecteur" du LEP, quand elle ne délivre pas des protons aux expériences de "cible fixe". Des dizaines d'expériences de ce type ont eu lieu au cours des vingt dernières années, mais de nos jours on peut les ranger en quelques grandes catégories, permettant chacune à sa manière d'approfondir notre connaissance des interactions fondamentales :

- les expériences étudiant la violation de CP;
- les expériences recherchant l'existence d'oscillation de neutrino;
- les expériences recherchant l'existence d'un plasma quark-gluon;

- les expériences de diffusion profondément inélastique lepton-nucléon.

Nous ne parlerons ici que de la dernière catégorie, les autres étant traitées plus loin de manière spécifique. Les expériences de diffusion inélastique se font avec des faisceaux de muons ou de neutrinos (eux-mêmes issus du faisceau de proton du SPS) que l'on fait interagir sur une cible d'hydrogène, de deutérium, ou d'élément plus lourd. En mesurant la cinématique du lepton diffusé ou du système hadronique produit lors de l'interaction, on est à même de mesurer les sections efficaces différentielles du processus qui sont reliées aux "fonctions de structure" du nucléon, résultant d'une combinaison de la densité des quarks et des gluons. Ces expériences, qui requièrent une grande précision, sont dans la lignée des expériences de Stanford des années 60-70 qui mirent en évidence indirectement les quarks. Deux expériences de diffusion de muons, EMC et BCDMS, ont précisément vérifié les prédictions de la chromodynamique quantique, en étudiant l'évolution des fonctions de structure en fonction de l'impulsion transférée lors de la diffusion.

Pour progresser sensiblement dans l'exploration de la structure ultime de la matière, une nouvelle voie, au-delà de la diffusion sur cible fixe, devait être créée ; c'est celle des collisionneurs électron-proton dont le prototype HERA à Hambourg a fourni cette année ses premières collisions après six ans de travail. Composé d'un anneau d'électron de 30 GeV, et d'un accélérateur supraconducteur (le premier de ce type en Europe) fournissant des protons de 820 GeV, cette machine de 2 km de diamètre a été construite avec l'aide du CEA. Deux expériences, H1 et ZEUS, composées chacune d'environ 400 physiciens, commencent, à analyser les premiers résultats. La participation française est concentrée dans H1, où elle concerne des parties importantes du détecteur, principalement le calorimètre à Argon liquide de 500 tonnes, ainsi que l'acquisition et l'analyse des données.

HERA est avant tout un formidable laboratoire pour l'étude de la structure fine du proton, puisque son pouvoir de résolution est de  $KT^{-1/2}$  m. Deux ré-



gimes extrêmes vont être particulièrement étudiés : celui où l'impulsion transférée au quark est très grande et qui est sensible à leur structure éventuelle, et celui où l'électron interagit avec les nombreux quarks qui portent une fraction très faible de l'impulsion du proton, ce dernier régime faisant appel à des aspects non-perturbatifs nouveaux de QCD.

## 7 - LA PHYSIQUE DES PARTICULES SANS ACCÉLÉRATEURS

Des expériences importantes peuvent être faites hors des installations de haute énergie : il s'agit de la recherche de nouveaux types de désintégrations extrêmement rares et de l'étude du rayonnement cosmique.

Le Laboratoire Souterrain de Modane a été créé dans le tunnel routier du Fréjus pour installer une expérience qui recherche la désintégration du nucléon prédite par les théories de grande unification. L'absence du signal au niveau de  $10^{31}$  à  $10^{32}$  années suivant les modes de désintégration a permis de rejeter SU(5), la théorie de jauge unifiée la plus simple. Ce résultat indique peut-être une situation plus complexe, qu'il est difficile d'explorer beaucoup plus loin avec la désintégration du nucléon, vu le bruit de fond des interactions des neutrinos produits par les rayons cosmiques dans l'atmosphère. D'ailleurs, la mesure du flux de ces neutrinos est un problème intéressant en soi, car il pourrait révéler les effets d'une masse éventuelle des neutrinos. Ce même type d'étude est poursuivi avec les anti-neutrinos émis par les réacteurs nucléaires : une expérience de deuxième génération est en cours auprès de la centrale EDF du Bugey,

Le site de Modane, bien protégé contre le rayonnement cosmique, est aujourd'hui utilisé pour la recherche de la désintégration  $\beta\beta$  (émission de deux électrons sans neutrinos) de certains noyaux. L'existence de ce phénomène impliquerait une violation du nombre leptonique et préciserait la nature profonde du neutrino, tout en mesurant sa masse. Ce programme expérimental a nécessité le

développement de détecteurs à très basse radioactivité. Il permet d'envisager des sensibilités de 0.1 eV pour la masse du neutrino, environ dix fois meilleure que les résultats actuels.

Enfin, l'étude du rayonnement cosmique a pris un nouvel essor avec l'extension de "l'Astronomie Gamma" dans le domaine du TeV. Pour identifier les accélérateurs cosmiques, on ne peut utiliser les particules chargées, déviées par les champs magnétiques galactiques, mais on recherche les photons, malheureusement beaucoup plus rares. La percée récente vient du développement de deux méthodes utilisant l'effet Cerenkov dans l'atmosphère et permettant de signer efficacement les gerbes engendrées par des gammas. L'une, mise en œuvre à l'observatoire américain WHIPPLE, repose sur une analyse des images des gerbes. L'autre, développée par deux expériences françaises, ASGAT (du CEA et de INSLO) et THEMISTOCLE (de l'IN2P3) localisées près de Font-Romeu, procède par un échantillonnage spatio-temporel précis du front d'onde. Le rayonnement gamma de la nébuleuse du Crabe a été observé très clairement par les trois groupes, THEMISTOCLE étendant les résultats jusque vers 20 TeV. La première source extra-galactique, le noyau actif de galaxie "Markarian 421" vient en outre d'être mise en évidence aux alentours du TeV à l'observatoire WHIPPLE. Une des perspectives les plus prometteuses de ce domaine est la détection de photons gamma produits par annihilation de particules "supersymétriques", vestiges du Big Bang et peut-être concentrées près du centre galactique.

## LES HADRONS

### 1 - INTRODUCTION

La physique hadronique est au confluent de la physique nucléaire et de la physique des particules. Son objet est de comprendre la structure et les in-

teractions des hadrons, c'est-à-dire les particules interagissant par interaction forte. L'intérêt majeur de cette étude est de s'intéresser au régime "non-perturbatif" de QCD et de chercher à comprendre le phénomène de confinement.

Les hadrons sont des états liés de quarks : une paire quark-antiquark pour les mésons, trois quarks pour les baryons ou trois antiquarks pour les antibaryons. Les quarks interagissent en échangeant les médiateurs de l'interaction forte, les gluons. QCD possède la propriété remarquable de "liberté asymptotique" : le couplage entre particules colorées (quarks ou gluons) décroît à petite distance, ce qui permet un traitement perturbatif. Par contre, à des distances de l'ordre des dimensions hadroniques ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ), la théorie perturbative ne s'applique plus et il faut avoir recours à d'autres approches : théories effectives, ou alors simulations numériques où l'espace-temps est discrétisé sur un réseau, qui ont permis d'obtenir des résultats très encourageants sur la spectroscopie des mésons.

Les progrès dans ce domaine sont donc liés au développement d'outils théoriques issus de QCD. Ces modèles effectifs sont évidemment approchés, mais ils permettent de progresser dans la compréhension des phénomènes non-perturbatifs et du confinement.

## 2 - SPECTROSCOPIE HADRONIQUE

La spectroscopie des hadrons composés de quarks légers est un domaine complexe dont la classification est assez bien décrite par le modèle des quarks non-relativistes. L'étude expérimentale définitive de ce domaine n'est pas terminée et nécessite encore des efforts importants. D'autres types d'états liés, comme des états multiquarks pourraient être mis en évidence. Des groupes français sont engagés dans cette direction (CERN, Saturne, Serpukhov).

Plus intéressant encore, QCD prédit des états purement gluoniques à cause de la charge de cou-

leur des gluons. Pour l'instant, la recherche de ces états est restée infructueuse, du fait de la difficulté de leur signature. La méthode la plus efficace pour produire ces états et les mettre en évidence est l'étude des désintégrations du charmonium (état lié du quark  $c$  et de l'antiquark  $\bar{c}$ ). Cette approche, déjà explorée sur les anneaux DCI à Orsay et SPEAR à Stanford, demande pour être menée à bien des statistiques très importantes qu'il est possible d'obtenir dans des anneaux  $e^+e^-$  de très haute luminosité ("usine tau-charme") ou par une extension à haute énergie de LEAR. Enfin, l'étude des mésons contenant des quarks lourds ( $c$ ,  $b$ ) se poursuit avec des anneaux  $e^+e^-$  à Cornell (Etats-Unis) et Hambourg.

## 3 - LES HADRONS COMME SYSTÈMES DE QUARKS CONFINÉS

Un effort théorique considérable a été entrepris pour comprendre le confinement, la croissance indéfinie de la force entre les quarks avec leur distance. Sans qu'une démonstration mathématique soit totalement acquise, ce phénomène serait similaire à celui du confinement des lignes de force du champ magnétique dans certaines régions de l'espace d'un supraconducteur. Dans le cas de QCD, ce sont les lignes de force du champ de couleur qui seraient ainsi confinées.

Une approche intéressante des hadrons formés de quarks légers a été développée. Du fait de leur faible masse, QCD possède pour ces quarks une symétrie globale approchée, la symétrie chirale. Cette symétrie est brisée dynamiquement, avec l'apparition d'états de basse masse, les mésons pseudoscalaires  $\pi$ ,  $K$  et  $\eta$ . Une théorie effective perturbative permet de rendre compte d'un grand nombre de propriétés des hadrons à l'aide de quelques paramètres caractérisant les propriétés du vide (le hadron le plus simple). Ces techniques permettent d'étudier théoriquement les modes rares de désintégrations des mésons  $K$ , d'un grand intérêt pour les tests de précision du Modèle Standard et la recherche de nouveaux phénomènes.

Les investigations expérimentales des désintégrations rares nécessitent un concept de machines à très haute luminosité ("usines"), capables de produire en très grand nombre les particules à étudier. C'est le cas de Saturne qui possède depuis 1991 un faisceau intense de mésons  $\eta$ . La construction d'un collisionneur  $e^+e^-$  d'environ 1 GeV a été décidée récemment à Frascati (DAΦNE) pour la production de mésons  $\phi$ , source de K chargés et neutres. D'autres possibilités sont à l'étude : les mésons K avec le projet canadien KAON, les mésons D dans une usine  $e^+e^-$  tau-charme, les mésons B dans une usine  $e^+e^-$  "à beauté".

Le spin des hadrons n'est pas bien compris dans le cadre de QCD. En particulier, les effets liés au spin devraient disparaître à haute énergie. Un grand nombre de mesures ont été accumulées avec des protons polarisés depuis Saturne à quelques GeV jusqu'à Fermilab à quelques centaines de GeV. Les effets de spin décroissent, mais sont toujours bien visibles aux plus hautes énergies. Un effort théorique est donc nécessaire pour comprendre ce phénomène.

Un domaine important reste celui des mécanismes de production hadronique à très haute énergie. La production multiple de hadrons constitue l'essentiel de l'interaction entre hadrons dans cette région. Les résultats au collisionneur du CERN, où de nombreux groupes français ont été engagés, montrent que la section efficace totale proton-antiproton croît avec l'énergie, comportement qui a été confirmé au Fermilab (Etats-Unis). Cette physique de la multiproduction, étendue aux collisions particule-noyau, concerne aussi les gerbes produites dans l'atmosphère par des particules cosmiques de très haute énergie, domaine sur lequel des théoriciens et expérimentateurs français travaillent activement.

Enfin, il est intéressant d'étudier le comportement des hadrons dans la matière nucléaire. Cette étude a été entreprise à Saturne avec la production de la résonance baryonique  $\Delta$  et un projet existe pour le méson  $\rho$  à Darmstadt (GSI). Ces mesures permettront de tester la validité de théories effectives et peut-être de mettre à jour de nouveaux comportements.

## 4 - DES HADRONS AUX QUARKS

La diffusion de leptons est un moyen privilégié d'étude des nucléons, soit à l'état libre, soit dans la matière nucléaire. Ces études ont été menées dans un grand nombre de laboratoires et ont conduit (voir la section précédente sur les quarks et les leptons) à élucider la structure en quarks des nucléons.

Dans le domaine de basse énergie, la France a joué un rôle important avec l'accélérateur linéaire d'Orsay de 2,3 GeV, puis celui de Saclay (ALS) de 700 MeV, plus adapté pour les études systématiques. Cette dernière machine vient d'être arrêtée dans la mesure où elle était surpassée par la nouvelle génération d'accélérateurs à courant continu qui viennent de démarrer à Mayence (850 MeV) et à Bonn (3.5 GeV mais à plus faible intensité) ou en cours de construction à Amsterdam (900 MeV). Plusieurs équipes de physiciens français ont lancé des programmes de recherche sur ces machines, en particulier pour l'étude des facteurs de forme des noyaux légers.

Cette tendance devrait s'accroître avec la mise en route de l'accélérateur linéaire à cavités supraconductrices de 4 GeV CEBAF (Etats-Unis), Remarquons qu'un projet français d'un accélérateur du même type était évoqué dans le précédent *Rapport de conjoncture*. Cette option a été abandonnée en faveur d'un projet plus ambitieux recommandé en 1989 par un Comité de l'Académie des Sciences.

Ce nouveau projet d'un accélérateur d'électrons de 15 GeV à grande intensité et à faisceau continu permettrait des études systématiques dans un domaine où la structure nucléonique et nucléaire se décrit en termes de quarks. Cet équipement ouvrirait des possibilités nouvelles d'expérimentation et permettrait de tester des idées suggérées par des modèles inspirés par QCD. Le projet a déjà été discuté par la Commission des Très Grands Equipements qui a souhaité disposer pour la fin de 1992 d'un rapport de projet. Il a aussi fait l'objet d'une discussion au Comité Européen de Coopération en Physique Nucléaire (NUPECC) qui a émis une re-



commandation très positive dans un rapport publié en octobre 1991. Un comité européen de projet a été mis en place. S'il aboutit, cet équipement contribuera de façon importante à l'étude de la physique hadronique et de QCD.

## LES NOYAUX

### 1 - INTRODUCTION

Durant ces dernières années, la physique du noyau s'est considérablement renouvelée du point de vue tant de ses objectifs que de ses modes de travail. Elle est devenue la physique des systèmes hadroniques et le noyau, quintessence d'un système quantique à  $n$  corps en Interaction forte, est aujourd'hui principalement étudié dans ses états extrêmes de *spin* (noyaux en rotation rapide), d'*iso-spin* (dissymétrie entre les nombres de protons et de neutrons) et de *température* (noyaux chauds et propriétés thermodynamiques de la matière nucléaire).

Ces thèmes de recherches, pour lesquels la contribution des physiciens français a été prépondérante, ont grandement bénéficié de l'existence d'accélérateurs performants et des appareils de détection sophistiqués qui les équipent. Les quelques exemples qui suivent servent à la fois d'éclairage aux problématiques actuelles et de guides pour les développements à court et moyen termes.

### 2 - NOYAUX ET SPIN : EXCITATIONS COLLECTIVES

Pendant très longtemps, les études des phénomènes liés à la structure nucléaire se sont limitées aux propriétés des noyaux stables à basse énergie d'excitation et à bas spin. Les phénomènes découverts ont fait l'objet d'études systématiques et les

principaux aspects des modes d'excitation du noyau proche de son état fondamental sont bien compris.

Plus récemment, de nouveaux degrés de liberté ont été abordés; mentionnons l'étude de l'excitation (et de l'amortissement) des résonances géantes isoscalaires et isovectorielles construites ou non sur des états excités, ainsi que la recherche d'excitation de multi-phonons. Mais l'un des développements les plus marquants concerne l'étude du fluide nucléaire à haut spin : la physique des noyaux en rotation rapide. Ces noyaux sont produits dans les réactions nucléaires de fusion induites par des faisceaux d'ions lourds. On y étudie par exemple l'influence de l'existence de brisures spontanées de symétries au niveau quantique, que Ton rencontre notamment dans les noyaux à déformation quadrupolaire ou octopolaire. Par ailleurs, pour des fréquences de rotation très élevées, la théorie prédisait que des effets de couches microscopiques pouvaient stabiliser des noyaux, de grande déformation. Ceux-ci ont pu finalement être observés grâce à l'avènement de multidétecteurs gammas très performants. Depuis 1986, ce phénomène de superdéformation a été mis en évidence dans plusieurs régions de la classification périodique (autour des masses 130,150 et 190). La forme du noyau est déduite directement des énergies des transitions électromagnétiques entre états excités (de spin compris entre 30 et 60) appartenant à une même bande de rotation superdéformée. Elle correspond à celle d'un sphéroïde allongé ("ballon de rugby") dont le rapport des axes est de 2:1, alors qu'il n'est que de 1.3:1 pour les noyaux déformés "ordinaires"<sup>11</sup>.

L'étude des noyaux en rotation rapide est aujourd'hui un domaine très vivant et riche qui ouvre de nombreuses voies de recherche parmi lesquelles on peut citer :

- la caractérisation de la nature de la transition entre les deux puits de potentiel superdéformés et "normaux";

- la compréhension de l'existence de bandes superdéformées identiques (à 1/1000 près !) dans

des noyaux voisins. Est-elle la signature de l'existence d'une nouvelle symétrie dans l'interaction nucléaire ?

- l'étude du degré de superfluidité du milieu nucléaire en rotation rapide;

- la recherche de structures hyperdéformées (de rapport d'axes 3:1) en contraignant le noyau à des spins proches de 80.

Ces noyaux à très haut moment angulaire sont toujours produits avec de très faibles sections efficaces. De réels progrès dans ce domaine sont donc liés à l'utilisation de multidétecteurs gammas d'excellente efficacité et de très bonne granularité. Pour ce faire, la communauté des physiciens français, s'est donné récemment les moyens de sa réussite. Elle a fait preuve d'innovation dans la conception et la réalisation d'un nouveau détecteur et de ses systèmes d'électronique et d'acquisition associée. Ce détecteur EURO GAM, qui est le fruit d'une collaboration exemplaire avec les physiciens nucléaires britanniques, a un pouvoir de résolution supérieur d'un facteur 100 à ceux des systèmes existants. Véritable microscope nucléaire, il permettra, par exemple, l'étude de la spectroscopie complète de ces noyaux en rotation rapide dans une plage étendue d'énergie d'excitation et de spin. Les premières expériences ont lieu à Daresbury (Angleterre) en 1992 et se poursuivront en 1993 auprès d'accélérateurs français et, en particulier, auprès du VIVITRON (Strasbourg), un nouvel accélérateur électrostatique de 35 MV, qui devrait délivrer ses premiers faisceaux à la fin de l'année 1993.

### 3 - NOYAUX ET ISOSPIN : NOYAUX EXOTIQUES ET FAISCEAUX SECONDAIRES

La découverte, au cours de ces dernières années, d'un grand nombre de noyaux éloignés de la ligne de stabilité et produits dans des réactions nu-

cléaires de fragmentation de la cible ou du projectile (en particulier auprès du GANIL à Caen) a permis d'aborder l'étude détaillée du noyau en fonction de l'isospin, un degré de liberté peu étudié jusqu'à présent, décrivant la dissymétrie entre les nombres de protons et de neutrons. Il est même aujourd'hui possible pour certains éléments légers d'aller jusqu'aux confins de la stabilité par interaction forte (on peut ainsi produire des espèces telles que  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{22}\text{C}$  ou  $^{22}\text{Si}$ ). On conçoit volontiers qu'un tel balayage suivant le degré de liberté isospin puisse contraindre très fortement les modèles théoriques. Par ailleurs, beaucoup de ces noyaux exotiques produits en laboratoire, qui sont des objets très éphémères (période radioactive courte), jouent un rôle essentiel dans le processus de nucléosynthèse stellaire (voir la section *Noyaux et nucléosynthèse stellaire*).

Plus récemment, il a été démontré que ces noyaux exotiques formés dans des réactions "primaires" pouvaient à leur tour servir de faisceaux pour induire des réactions "secondaires" encore plus exotiques. De tels faisceaux permettront d'étudier les excitations du noyau dans des conditions extrêmes d'isospin jamais atteintes en laboratoire et de tester ainsi la limite de validité des modèles de base (modèle en couche et modèles collectifs) qui ont été élaborés et perfectionnés progressivement à partir des noyaux stables ou proches de la stabilité. Il y a seulement 280 noyaux stables dans la nature, alors qu'il devrait être possible de produire plusieurs milliers de noyaux radioactifs. Les conséquences des études de la dépendance en isospin des interactions effectives peuvent être nombreuses, puisqu'on s'attaque à la description de ce qui est la brique élémentaire de pratiquement toute approche théorique moderne. Les édifices essentiels à notre compréhension actuelle de la structure nucléaire garderont-ils le caractère universel qu'on leur prête ou seront-ils altérés de façon significative? Qu'advient-il des brisures de symétrie connues? D'autres apparaîtront-elles? Telles sont les questions fondamentales qui pourraient trouver des réponses si Ton dispose de faisceaux de noyaux exotiques. Les deux exemples qui suivent illustrent cette problématique.

## Phénomènes de halo de neutrons

Nous savons aujourd'hui que certains noyaux légers riches en neutrons développent un halo et que leur densité neutronique s'étend à des distances anormalement grandes (le  $^{11}\text{Li}$  a ainsi une extension spatiale équivalente à celle du plomb !). On peut espérer produire et étudier d'autres noyaux avec halo, leur étude offrant la possibilité unique d'approfondir nos connaissances sur la matière de neutrons, l'interaction neutron-neutron, les systèmes à densité anormalement faible. L'interaction effective nucléaire dépend de la densité nucléaire, et cet aspect non exploré de la structure des forces effectives pourra être précisé par des expériences avec les faisceaux exotiques.

## Synthèse des noyaux très lourds et super-lourds

L'un des problèmes les plus fascinants, qui a retenu l'attention des physiciens nucléaires depuis plus de vingt ans, concerne la production d'éléments lourds et super-lourds. Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années dans la description de la matière nucléaire froide. Ces calculs, étendus aux éléments très lourds, confirment la prévision d'une zone de stabilité dans une zone centrée à  $Z = 114$  et  $N = 184$  qui est tout simplement due à la structure en couches du noyau. Un résultat encourageant concerne les durées de vie de ces noyaux qui seraient supérieures à la microseconde rendant possible leur détection et identification. Il faut cependant créer des noyaux aussi froids que possible afin qu'ils ne fissionnent pas lors de leur désexcitation. La mise en évidence de l'existence des noyaux super-lourds constituerait l'un des tests ultimes des modèles nucléaires, tant du point de vue microscopique que macroscopique.

La communauté internationale de physique nucléaire souhaite pouvoir disposer dans un proche avenir d'accélérateurs d'ions lourds permettant d'induire des réactions nucléaires avec des faisceaux secondaires. De tels faisceaux à des énergies de quelques dizaines de MeV par nucléon seront dis-

ponibles au GANIL grâce à des développements récents de l'accélérateur et de ses équipements. Cependant une forte demande concerne aussi des faisceaux d'énergies comprises entre 1 et 20 MeV par nucléon qui ouvriront des perspectives tout à fait nouvelles, tant en physique du noyau qu'en astrophysique nucléaire. La France est particulièrement bien placée dans ce domaine.

## 4 - NOYAUX ET TEMPÉRATURE : NOYAUX CHAUDS ET ÉQUATION D'ÉTAT DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

L'étude du noyau à haute température CL dans des conditions de pression et de densité parfois très éloignées de l'équilibre a, quant à elle, pour but affirmé d'explorer le diagramme de phase de la matière nucléaire et de préciser ainsi les ingrédients de l'équation d'état. Les principaux instruments dans ce domaine sont les accélérateurs GANIL et SIS (Darmstadt).

Les expériences ont montré que le noyau reste "stable" en tant qu'entité jusqu'à des températures très élevées, au-delà de 5 MeV (50 milliards de degrés). Diverses méthodes sont utilisées pour caractériser la limite d'existence d'un noyau, y compris récemment à GANIL et SARA l'étude de la disparition progressive avec la température de l'excitation de modes collectifs tels que la résonance dipolaire géante. Ces études systématiques de température limite sont en accord avec une équation d'état "douce" de la matière nucléaire. Notons par ailleurs qu'à de telles températures on peut ainsi recréer en laboratoire les conditions voisines de celles propres à l'apparition de phénomènes liés à l'astrophysique nucléaire de la matière dense tels que l'explosion de super-nova et la formation d'étoiles à neutrons,

Il est maintenant acquis, grâce à l'utilisation de détecteurs  $4\pi$  performants, que les collisions les plus centrales, qui sont les plus violentes, peuvent induire une cassure du système conduisant à l'émission d'une gerbe de nucléons et de fragments lé-



gers. Preuve en est faite expérimentalement au GANIL et à SARA à travers la mesure des multiplicités de neutrons (Orion), de particules chargées et de fragments (Nautilus, Amphora). Ce qui n'est pas établi de façon claire aujourd'hui est le processus qui conduit à cette multifragmentation du système nucléaire. Des modèles théoriques montrent que celle-ci peut être induite sous l'effet d'excitations d'ordre purement thermiques, mais aussi des modes collectifs de rotation et de compression. Les théories de transport appliquées aujourd'hui en physique nucléaire indiquent que le système nucléaire, après un premier stade de compression et de chauffage, évolue vers une phase d'expansion de façon telle que de très faibles densités nucléaires sont atteintes. Il entre alors dans une zone d'instabilité, de compressibilité négative, où les fluctuations de densités croissent très rapidement conduisant à la multifragmentation. Une signature non ambiguë d'un tel processus d'origine dynamique est activement recherchée. La mise en service d'une nouvelle génération de multidétecteurs tels que le détecteur INDRA au GANIL devrait fortement y aider.

L'étude des propriétés des noyaux chauds ne peut être dissociée des conditions qui ont permis leur formation. C'est pourquoi une étude détaillée de la dynamique des collisions a été entreprise : caractérisation des premières collisions nucléon-nucléon à travers l'émission de rayonnement de freinage ou la production de particules sous le seuil, telles que pions et kaons, détermination du temps caractéristique de l'équilibre thermique, étude du "flot". Ce dernier point concerne l'écoulement latéral de matière au cours de la collision dans le plan et hors du plan de réaction. Une inversion du flot est observée aux énergies du GANIL liée à la transition entre les collisions à un corps (champ moyen) et les collisions à deux corps (nucléon-nucléon). Ce flot est sensible à l'interaction effective nucléon-nucléon dans le milieu nucléaire et au paramètre d'incompressibilité, deux ingrédients essentiels de l'équation d'état.

La contribution française à ces études sur les noyaux chauds et sur la matière nucléaire à haute densité et haute température est de tout premier

ordre, et ces équipes continueront de participer très activement aux programmes sur ces thèmes auprès des accélérateurs nationaux (GANIL, SARA), ainsi qu'à l'accélérateur SIS de Darmstadt. Signalons enfin les expériences avec les ions lourds relativistes au CERN qui explorent un autre domaine du diagramme de phase de la matière nucléaire avec la recherche du déconfinement des hadrons en un plasma de quarks et de gluons (voir la section *Recherche du plasma de quarks et de gluons*).

## L'UNIVERS

### 1 - LES ENJEUX

L'astronomie et l'astrophysique regroupent, d'une part, des activités instrumentales et d'observation et, d'autre part, l'application de la physique à la compréhension des mécanismes qui régissent la structure et le comportement des astres. En plus des enjeux généraux de la physique, l'astronomie est la source de valeurs ajoutées spécifiques :

- à l'amont de la physique, elle stimule des développements aussi bien théoriques (par exemple en physique des plasmas) qu'instrumentaux;

- à l'aval, elle permet d'éprouver des lois de la physique dans des conditions inaccessibles en laboratoire et qui donnent à l'Univers le statut de laboratoire singulier. Mentionnons les conditions de très hautes densité, pression et température (le cœur des étoiles par exemple), ou au contraire de très faibles densité et pression (le milieu interstellaire), ou encore de très forts champs magnétique ou gravitationnel (la surface des étoiles très compactes -10 km de rayon -que sont les étoiles à neutrons). Elle interagit donc avec tous les secteurs dont s'occupe la physique : les particules élémentaires, noyaux, atomes, molécules et milieux macroscopiques.

A côté de ces enjeux scientifiques, l'astronomie est certainement de toutes les sciences exactes celle qui possède les plus grands enjeux culturels qu'il ne faut pas négliger. On peut les illustrer par la question des origines et des confins de l'Univers et par celle de l'existence éventuelle d'autres Terres, habitables ou non, en dehors du système solaire.

L'astronomie étudie l'Univers sous deux angles distincts : d'une part, l'Univers comme un tout dont on cherche à préciser les caractéristiques et l'évolution globales (c'est l'objet de la cosmologie"), et, d'autre part, la structure et révolution des objets dont l'ensemble constitue cet univers. Ces objets sont d'une très grande diversité, allant de grains solides microscopiques jusqu'aux amas de galaxies, et notre époque se caractérise par la découverte de types d'objets toujours nouveaux.

## 2 - L'UNIVERS PRIMORDIAL

Dans les modèles usuels, l'Univers a "débuté" il y a environ 10 à 15 milliards d'années par une explosion, le Big Bang, à partir d'un état extrêmement dense et chaud. Depuis le Big Bang, l'Univers est en expansion, probablement extrêmement rapide dans une première phase dite d'inflation, puis modérée comme l'atteste les mouvements des galaxies lointaines, et sa température décroît en conséquence.

Dans le modèle actuel il y a au départ un gaz en équilibre thermique contenant les particules élémentaires : les quarks, les leptons, les bosons de jauge (photons, W,  $Z^0$ , gluons), les bosons de Higgs et éventuellement, lorsque la température est très élevée, les particules postulées par les théories d'unification de toutes les interactions. Dans cette "soupe primordiale", il y a autant d'antiparticules que de particules; cela pose d'emblée un problème qu'il faut résoudre : qu'est devenue l'antimatière primordiale puisqu'aujourd'hui les observations astronomiques semblent montrer qu'il n'y a plus que de la matière ? La physique corpusculaire propose des mécanismes de disparition des antiparticules basés sur la brisure de la symétrie CP. Une des com-

posantes de ce gaz chaud est le plasma de quarks et de gluons, sujet d'études intéressantes pour la physique des particules. Lorsque la température descend à quelques millions de millions de degrés, les quarks se confinent pour donner les baryons actuels (protons et neutrons). Au bout de trois minutes, lorsque la température a atteint un milliard de degrés, environ le quart des baryons fusionne en noyaux d'hélium, avec une fraction d'environ  $10^{-5}$  de deutérium. La proportion exacte de l'hélium et du deutérium dépend du nombre d'espèces de neutrinos et de la densité baryonique de l'Univers. L'observation de ces proportions permet donc de remonter à ces paramètres. Il est remarquable que le nombre d'espèces de neutrinos (trois) déterminé de la sorte coïncide avec celui déduit au LEP de la largeur du boson  $Z^0$ .

Environ un million d'années après le Big Bang, la température de l'Univers étant tombée à environ 4 000 degrés, les électrons se recombinent aux noyaux pour former des atomes, et l'Univers devient transparent à la lumière ambiante. Celle-ci nous parvient aujourd'hui, au bout de 10 milliards d'années, décalée vers le rouge par effet Doppler dû à l'expansion de l'Univers depuis cette phase de recombinaison qui nous apparaît comme un corps noir à 3 degrés Kelvin dont le spectre a été récemment mesuré avec grande précision par le satellite COBE.

Dans ce Modèle Standard, le devenir de l'Univers est directement lié à sa densité : l'expansion (dont le taux n'est encore connu qu'à un facteur deux près), issue du Big Bang, s'arrêtera et l'Univers s'effondrera si - et seulement si - la densité moyenne de l'Univers est plus grande qu'une densité critique, et donc l'estimation de la densité moyenne de l'Univers constitue un des axes majeurs de la recherche en cosmologie.

Aujourd'hui l'Univers est composé de gaz et probablement de matière noire (voir la section sur *les aspects interdisciplinaires*) faite peut-être de particules de type inconnu, et bien sûr d'étoiles assemblées (avec gaz et poussières) en galaxies. La distribution de ces galaxies (en paires, groupes,

amas, et superamas à grande échelle) conduit à deux grandes questions : l'énigme de la "masse manquante" (voir section *Matière noire* ci-après), et l'origine de la structuration de l'Univers en galaxies et en amas de galaxies.

### 3 - LES GRANDES STRUCTURES DE L'UNIVERS

L'Univers est aujourd'hui très inhomogène, les galaxies étant beaucoup plus denses que l'espace intergalactique. Cette inhomogénéité s'explique généralement par la croissance causée par la gravitation des faibles perturbations de densité dans l'Univers primordial. Cette croissance dépend de la distribution initiale des échelles de ces perturbations et de leur évolution initialement linéaire.

Les analyses récentes de la structure de l'Univers à grande échelle utilisent divers relevés à deux ou trois dimensions contenant de 3 000 à un million de galaxies. Ils ont tous montré une structuration à grande échelle qui semble être trop forte par rapport aux prédictions de la théorie la plus courante aujourd'hui, la matière noire froide, et cela soit directement, soit de façon statistique. Des contraintes analogues proviennent de la découverte récente d'amas de galaxies dont le gaz inter-galactique est trop chaud par rapport, aux prédictions. La découverte récente par le satellite COBE de variations de un pour cent mille de la température du fond cosmique sur des échelles de 10 degrés d'angle constitue une étape importante en cosmologie : elle confirme les bases du modèle standard, tout en semblant éliminer plusieurs théories sur la formation des galaxies (telles que la matière noire froide biaisée et les textures). Finalement, des clichés ultra-profonds ont récemment décelé une périodicité de la distribution des galaxies à très grande échelle, résultat depuis très controversé.

Un sondage profond de l'Univers dans l'Hémisphère Sud a été proposé sur le site du VLT; 0 serait complémentaire des mesures entreprises aux Etats-Unis.

## 4 - LES GALAXIES

Les galaxies apparaissent comme des usines complexes dont les constituants, typiquement cent milliards d'étoiles, du gaz, et des poussières sont en inter-relation riche. Elles sont de nature et aspect très variés, constituées de trois composantes : le disque, très aplati, riche en étoiles jeunes, en gaz et en poussières, montrant généralement des bras spiraux, et souvent une distribution en barre; le bulbe, arrondi, peuplé d'étoiles plus âgées, mais dénué de gaz et de poussière; et enfin le halo de matière noire, dont la présence est déterminée par la cinématique interne du disque.

L'origine des différents types morphologiques observés est toujours sujet à débat entre partisans de la différenciation au moment de la formation des galaxies et ceux pour qui l'évolution dynamique (par fusions, effets de marées ou effets hydrodynamiques) est le moteur de ces différences. Ces derniers s'appuient en partie sur le beau spectacle qui nous est offert par la dynamique gravitationnelle dans certaines paires de galaxies, ainsi qu'au cœur des amas, où les galaxies en interaction prennent des formes exotiques, généralement reproductives par simulations numériques.

Si les trajectoires des galaxies sont susceptibles de déterminer leur évolution, la cinématique des étoiles qui les constituent est un traceur de leur distribution de masse. Aux bords, cette analyse nous permet de conclure à l'existence de halos de matière noire, tandis qu'au centre, il semble de plus en plus probable que la cinématique des étoiles soit dominée par des trous noirs supermassifs de millions ou même milliards (pour les quasars) de masses solaires. Ces trous noirs constituent donc des gigantesques réservoirs d'énergie gravitationnelle servant à propulser la matière dans des "jets" de particules relativistes, longs de millions d'années lumière, ainsi qu'à chauffer et exciter le gaz qui rayonne intensément dans pratiquement toute la gamme du spectre électromagnétique (en particulier, l'observation de raies  $\gamma$  nucléaires par l'expérience franco-soviétique SIGMA),



Poussant la limite des détecteurs actuels, différents groupes d'astronomes ont récemment montré que les galaxies aux flux les plus faibles ne seraient pas très distantes, mais plutôt intrinsèquement faibles. L'étude de l'évolution des galaxies, en luminosité et en nombre, apporte une contrainte importante aux théories de formation des galaxies.

## 5 - LA PHYSIQUE STELLAIRE

Les étoiles elles-mêmes sont de type très divers, de sorte qu'il y a en permanence un foisonnement de résultats nouveaux dans le domaine de la physique stellaire et interstellaire, surtout pour notre Galaxie. Les recherches se concentrent sur les mécanismes de formation d'étoiles, le raffinement des calculs de leur structure interne et la comparaison des flux de neutrinos prédits avec les observations récentes de ces particules (voir la section *Neutrinos* pour les neutrinos émis par le Soleil), les détails des derniers stades de leur évolution, l'origine des vents stellaires d'atomes et molécules, parfois ionisés, les détails de la physique des étoiles les plus massives : la synthèse des éléments lourds (carbone, oxygène, azote et fer), et leur explosion en supernovae. Dans ce foisonnement, notons quelques faits saillants.

- Le radiotélescope d'Arecibo a annoncé, début 1992, la découverte de deux planètes autour d'une étoile à neutrons : ce serait, si elle était confirmée, la première découverte de planètes extrasolaires. Il reste à comprendre comment des planètes peuvent exister autour de ce type d'étoiles si compactes; peut-être faudra-t-il remanier le scénario de leur formation à partir de l'explosion d'une supernova. La recherche de planètes extrasolaires plus classiques se poursuit par ailleurs avec des techniques variées.

- Les sursauts  $\gamma$  : ces bouffées de rayons gamma, de quelques keV à une centaine de MeV, apparaissent dans le ciel au rythme d'environ un par jour et durent quelques secondes. Jusqu'ici, on pensait qu'ils étaient d'origine galactique, dus par

exemple à la capture explosive de matière par des étoiles compactes. Or le satellite *Compton Gamma Ray Observatory* a mis en évidence, à la fin de 1991, que ces sursauts avaient une distribution spatiale apparemment incompatible avec une origine galactique; mieux encore, cette distribution ne semble s'expliquer naturellement que s'ils sont issus des confins de l'Univers, ce qui les met à des distances comparables à celle des quasars. De telles distances leur confèrent nécessairement une puissance d'émission intrinsèque considérable qu'il s'agit maintenant d'expliquer

- L'effondrement gravitationnel relativiste offre des prédictions propres à la théorie de la relativité; celles-ci devraient devenir testables directement grâce au projet VIRGO (voir la section sur *la détection des ondes gravitationnelles*). C'est ainsi que, récemment, une équipe du CNRS a pu calculer numériquement l'amplitude des ondes gravitationnelles émises lors d'un effondrement stellaire, ainsi d'ailleurs que le flux de neutrinos émis.

- La notion de disque d'accrétion autour d'un objet central, apparue voici une dizaine d'années dans l'étude des étoiles binaires cataclysmiques, s'étend maintenant à d'autres objets comme les noyaux de galaxies, par exemple, et constitue un domaine de recherche actif au sein du CNRS, avec un aspect important de simulation numérique.

- Dans le domaine de la structure interne des étoiles, l'astrosismologie prend une part croissante : elle permet, par l'étude des modes de vibration des étoiles (avec des périodes de quelques minutes à quelques heures) de sonder leurs couches internes et ainsi de connaître l'état de la matière dans ces zones profondes. Plusieurs équipes du CNRS collaborent à ces programmes internationaux, pour l'instant au sol, plus tard dans l'espace. La mission spatiale SOHO, prévue pour 1995, permettra l'étude en continu des oscillations solaires.

## 6 - LE MILIEU INTERSTELLAIRE

Le milieu interstellaire (composante gazeuse et structure complexe, agrégats, grains...) joue un rôle-clé dans le processus de formations des étoiles et l'évolution des galaxies.

Outre la recherche de nouvelles molécules à l'aide du télescope de 30 m de l'IRAM, de nombreux programmes d'observation ont été développés; citons en particulier ceux liés à l'étude des rapports isotopiques et à la mesure des abondances relatives des différentes molécules observées. Les cartographies en cours d'élaboration, qui peuvent être obtenues avec une résolution angulaire satisfaisante grâce à l'interféromètre de l'Institut de Radioastronomie Millimétrique (Grenoble), constituent une étape importante pour l'obtention d'une meilleure connaissance des phénomènes complexes qui régissent la dynamique des nuages interstellaires ainsi que la structure et la chimie des enveloppes circumstellaires.

La compréhension de la formation et de la dynamique réactionnelle des nuages interstellaires demeure l'un des problèmes les plus complexes de l'astrophysique (turbulence). Les modélisations réalisées apportent des informations utiles sur des processus en pleine évolution, qui doivent être le plus souvent décrits par des situations hors équilibre. Des expériences ont pu être réalisées au laboratoire dans des conditions de Température (10 K) et de pression analogues à celles régnant dans le milieu interstellaire. Elles utilisent la détente de gaz dans des écoulements supersoniques. Il a été ainsi possible de mesurer les coefficients de vitesse des réactions ion-molécule et des réactions entre deux radicaux neutres.

L'attribution récente par des équipes françaises de raies d'émission IR à des molécules polycycliques aromatiques (PAHs) qui pourraient contenir dans certaines régions une fraction importante du carbone interstellaire a stimulé l'intérêt de la communauté scientifique sur ce sujet. La comparaison des spectres reçus avec ceux obtenus au laboratoi-

re indique toutefois des différences importantes qui pourraient être expliquées par la présence dans l'espace, non des formes neutres, mais d'espèces ioniques, partiellement déshydrogénées. Ces entités ont fait l'objet de diverses études tant théoriques qu'expérimentales. Par ailleurs, le fait qu'une molécule polyaromatique telle que le phénanthrène ait été identifiée très récemment dans la comète de Halley relance la question de l'origine interstellaire des composés planétaires.

La composition, la structure, la taille, la formation, l'évolution des grains et leur interaction avec le gaz demeurent les problèmes majeurs de la physico-chimie interstellaire et circumstellaire. Leur observation dans de bonnes conditions est toutefois liée au développement de système d'analyse IR performants, comme celui du CFHT. Le lancement du satellite ISO en 1995 devrait stimuler ces recherches. Une approche interdisciplinaire réunissant des chimistes du solide et des organométalliens commence à se mettre en place. L'analyse par les géochimistes des micrograins des météorites semble confirmer que certains proviennent directement d'enveloppes circumstellaires.

## 7 - LES MOYENS INSTRUMENTAUX

Ces dernières années ont vu la réalisation ou la mise en charnier d'un grand nombre de moyens instrumentaux au sol ou dans l'espace auxquels participent la France en général et, plus spécifiquement, le CNRS.

### Au sol

Le CFHT avec son instrumentation de pointe (caméra CCD grand champ, spectrographe multi-objets, caméra IR, optique adaptative) reste un instrument compétitif, compte tenu de la qualité exceptionnelle du site.

L'organisation *European Southern Observatory* (ESO) a décidé la construction du VLT, un en-

semble, le plus grand du monde, de quatre télescopes de 8 m de diamètre au Chili. Il doit, à partir de 1998, permettre d'observer des astres 10 à 100 fois plus faibles que les limites actuelles de luminosité, accédant ainsi aux galaxies les plus lointaines. D'autre part, plusieurs modes d'opération feront profiter du maximum de son pouvoir de résolution, faisant accéder à des détails plus fins des objets observés : enveloppes stellaires, étoiles multiples, noyaux de galaxies et peut-être planètes extrasolaires. Ces modes d'opération utiliseront l'interférométrie des faisceaux reçus par plusieurs télescopes afin d'obtenir une haute résolution angulaire, et les ressources de l'optique adaptative qui permet de compenser les mouvements de l'atmosphère. La France a depuis longtemps un rôle d'initiative dans ce domaine.

Un consortium européen animé par une équipe de l'Observatoire de Paris a été sélectionné pour équiper le VLT d'un spectrographe à fibres optiques (FUEGOS) permettant d'observer simultanément une centaine d'objets, ce qui facilitera la mesure des vitesses dans les amas d'étoiles et les amas de galaxies.

Le télescope solaire Thémis, dont la construction par le CNRS se fait maintenant en collaboration avec l'Italie, permettra de mieux comprendre les phénomènes magnétiques à la surface du Soleil (microstructure du champ magnétique, éruptions etc.).

Dans le domaine infrarouge le projet DENIS effectuera à partir de 1993 une carte du ciel à 2 mm en collaboration principalement avec les Pays-Bas. On en attend plusieurs types de résultats : détection éventuelle d'étoiles peu massives et très froides (naines brunes), étude des environnements stellaires, structure globale de la Galaxie, répartition des galaxies à grande échelle dans l'Univers.

Enfin, au sol toujours, le projet VIRGO (voir la section sur *la détection des ondes gravitationnelles*) devrait opérer une percée spectaculaire aussi bien du point de vue de la physique fondamentale (confirmation de l'existence d'ondes gravitationnelles) que de l'astrophysique (observation de l'instant de coalescence de certaines étoiles binaires).

## Dans l'espace

L'opération de relevé astrométrique et photométrique de 120 000 étoiles par le satellite Hipparcos est une réussite remarquable; la richesse et la complétude, jamais égalées, de l'échantillon, d'étoiles observées rejaillira sur de nombreux domaines de la physique stellaire et galactique; en particulier, il permettra de se faire une image plus précise de la galaxie et d'asseoir sur une base solide la calibration absolue des échelles de distance. Notons le rôle de premier plan d'équipes du CNRS qui, pour les unes, ont préparé le catalogue des étoiles à observer, et pour les autres participent au dépouillement des données recueillies.

Le *Hubble Space Telescope* lancé par la navette spatiale américaine en 1989 est actuellement opérationnel; si pour l'instant il n'a pas fait de découvertes exceptionnelles, il a permis de préciser la structure complexe d'un très grand nombre d'astres de types très différents : environnements circumstellaires, noyaux de galaxies, amas globulaires etc.

La sonde Ulysse, lancée avec succès en 1990, a été catapultée gravitationnellement par Jupiter en dehors du plan de l'écliptique : elle offrira ainsi le premier accès à l'étude du milieu interplanétaire en dehors de ce plan et des pôles du Soleil. La France est un des partenaires de la construction et de l'exploitation de cette sonde.

Le satellite européen *Infrared Space Observatory (ISO)*, à la construction duquel participent plusieurs équipes françaises, sera lancé par Ariane en 1995. On attend de lui des renseignements inédits pour la compréhension de la formation des étoiles et de la composition des poussières interstellaires et circumstellaires. Plusieurs équipes françaises participeront à son exploitation.

Des projets à plus long terme, dans lesquels les Français sont forcément impliqués, concernent l'astronomie X et  $\gamma$ , ainsi que l'astrosismologie spatiale.



# QUELQUES ASPECTS INTERDISCIPLINAIRES

## - VIOLATION DE CP ET COSMOLOGIE

La violation de la symétrie CP (définie comme l'échange simultané particule-antiparticule et droite-gauche) a été découverte dans les interactions faibles en 1964, par l'observation d'une désintégration théoriquement interdite des mésons K neutres. Au lieu d'introduire l'existence d'une nouvelle interaction, on a réalisé que le Modèle Standard avec 3 familles de quarks et de leptons contient naturellement un paramètre autorisant la violation de CP. Deux expériences de pointe en ce domaine (l'une au CERN, l'autre à Fermilab) ont terminé leur analyse, mais ne permettent pas de trancher entre les deux possibilités. D'autres expériences encore plus précises sont projetées. Enfin, il apparaît essentiel d'élargir le cadre de l'expérimentation et d'étudier la violation de CP dans un autre système particule-antiparticule : de ce point de vue, la construction d'une machine  $e^+e^-$  à très haute luminosité ("usine BB") serait un atout incomparable. Des projets existent aux Etats-Unis et au Japon et devraient attirer des équipes françaises.

Par ailleurs, la Chromodynamique Quantique contient la possibilité de violation de CP dans les interactions fortes. Des mesures à l'ILL du moment électrique dipolaire du neutron (couplage du spin du neutron à un champ électrique) montrent que cette violation doit être au moins  $10^9$  fois plus faible que les interactions fortes ordinaires. Un tel facteur de suppression n'est pour l'instant pas compris théoriquement.

L'effet le plus spectaculaire provoqué par la violation de CP, pourrait bien être celui de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers, comme Ta

proposé Sakharov en 1967 : alors qu'on s'attendrait à observer un univers composé à parts égales de matière et d'antimatière, on trouve (notamment dans les rayons cosmiques) que l'antimatière ne représente aujourd'hui qu'une partie infime de l'Univers. L'expérience Artémis, lancée par l'IN2P3, vise d'ailleurs à une mesure plus précise de l'abondance d'antiprotons.

L'asymétrie matière-antimatière aurait pu se produire dans l'Univers primordial si des interactions violent le nombre baryonique et CP. Les théories de Grande Unification prévoient de telles interactions par lesquelles le proton doit se désintégrer. Par ailleurs, dans le modèle du Big Bang proposé aujourd'hui, il y a une étape d'expansion extrêmement rapide, dite d'inflation, qui effacerait une possible asymétrie matière-antimatière. Il faudrait donc que cette étape d'inflation se termine à une température plus haute que l'échelle de Grande Unification, qu'on estime de l'ordre de  $10^{15}$  GeV. Il n'est cependant pas exclu d'expliquer une violation du nombre baryonique dans le cadre plus traditionnel du Modèle Standard, comme ont pu le montrer des travaux récents.

## 2 - NEUTRINOS

### Nombre de neutrinos

Le modèle du Big Bang permet de calculer les abondances des éléments légers (hydrogène, hélium, lithium), en fonction de la densité baryonique de l'univers, et du nombre de particules légères (de masse inférieure à 1 MeV). L'accord avec les observations implique qu'il n'y en ait pas d'autres que le photon et les 3 neutrinos déjà connus. Ce résultat ancien est confirmé par la mesure à l'accélérateur LEP du temps de vie du boson intermédiaire  $Z^0$  : plus cette particule a de modes possibles de désintégration, plus sa durée de vie est brève. Les résultats du LEP indiquent ainsi qu'il n'y a que 3 neutrinos légers.

## Masse des neutrinos

Il n'y a pas d'indication expérimentale que les neutrinos aient une masse, mais seulement des limites supérieures : 7 eV pour le neutrino de l'électron, 500 keV pour celui du muon et 31 MeV pour celui du tau. La limite sur la masse du neutrino de l'électron vient de la mesure du spectre bêta du tritium : une masse non nulle diminuerait d'autant l'énergie maximale de l'électron,

Il n'existe pas de raison théorique interdisant aux neutrinos d'être massifs, la difficulté est de leur donner une masse beaucoup plus petite que celle de l'électron. En effet, le modèle du Big Bang permet de calculer l'abondance actuelle des neutrinos en fonction de leur masse : leur densité ne dépasse pas la densité critique de l'univers si leur masse est inférieure à 100 eV. Ils pourraient alors constituer la matière noire de l'univers.

La bouffée de neutrinos observée au moment de l'explosion de la supernova SN1987A n'a pas duré plus de 10 secondes, ce qui correspond à peu près à la durée prévue. Cela implique que les neutrinos en question, des neutrinos de l'électron, ont une masse au plus très faible, sinon les plus énergétiques seraient arrivés bien plus vite que les moins énergétiques. Le faible étalement du sursaut conduit à une masse inférieure à 20 eV, ce qui est moins précis que les expériences en laboratoire, mais les corrobore.

Si les neutrinos ont une masse, ils peuvent se transformer les uns dans les autres (ce qu'on appelle des oscillations de neutrinos). Un neutrino observé loin de la source est différent de celui qui a été produit, son identité varie périodiquement avec sa distance à la source, et cette période dépend de la différence entre les (carrés des) masses des neutrinos. Ces oscillations ont été recherchées sans succès près des réacteurs nucléaires (par exemple, expérience à la centrale du Bugey), et une nouvelle génération d'expériences beaucoup plus sensibles est en préparation au CERN.

## Neutrinos solaires

Les réactions nucléaires au centre du Soleil, qui produisent l'énergie rayonnée par le Soleil, produisent aussi un grand nombre de neutrinos, qui quittent immédiatement le centre du Soleil : les détecter nous renseigne donc directement sur ce qui s'y passe (alors que les photons viennent de la surface). Depuis vingt ans, l'expérience pilote de Homestake aux Etats-Unis détecte la capture des plus énergétiques par du chlore, mais observe un flux trois fois plus faible que le prévoient les modèles du Soleil. Ce déficit est confirmé par le détecteur Cerenkov de Kamioka au Japon. Les neutrinos les plus énergétiques ainsi détectés sont produits par des réactions nucléaires marginales très sensibles aux conditions régnant au centre du Soleil, et dont certaines ne sont pas bien mesurées en laboratoire. De nombreuses modifications des modèles solaires ont été tentées, mais à chaque fois le modèle s'est trouvé en défaut sur un autre point. Une alternative est que les neutrinos aient une masse et que leur identité soit modifiée entre le cœur du Soleil et la Terre (oscillation), réduisant ainsi, le flux détectable. Pour trancher entre une modification du modèle solaire, et une oscillation des neutrinos, deux expériences, GALLEX (où la participation française est importante) et SAGE, ont entrepris de détecter les neutrinos de plus basse énergie par capture sur du gallium. Leurs premiers résultats, encore imprécis, indiquent encore un flux de 30 % plus faible que prévu par les modèles du Soleil, mais compatible avec un déficit dû aux seuls neutrinos de haute énergie. La précision s'améliorant au fil du temps, on peut espérer une réponse dans quelques années.

## 3 - LA MATIERE NOIRE

Il existe de nombreuses raisons, observationnelles et théoriques, de penser qu'une grande partie de la matière de l'univers n'est pas lumineuse. Un premier indice vient de la vitesse de rotation des étoiles dans la plupart des galaxies spirales, qui indique que leur masse est une dizaine de fois plus

élevée que la masse totale des seules étoiles. De plus, la masse obscure est plus étendue que la partie lumineuse, conduisant à l'image d'un cœur lumineux enfoui dans un immense halo sombre.

La distribution de vitesse des galaxies dans les amas de galaxies indique qu'il existe aussi beaucoup de matière sombre entre les galaxies, deux à dix fois plus que dans les galaxies (halo compris). Ces estimations ont été confirmées par l'observation, due à une équipe française, de plusieurs arcs lumineux géants dans des amas de galaxies. Ces arcs sont des mirages gravitationnels : la masse de l'amas dévie les rayons lumineux venant d'une galaxie ou d'un quasar situé à l'arrière-plan, et l'arc est l'image déformée de cette galaxie.

Une analyse récente de la distribution à grande échelle des vitesses des galaxies indique que les amas se déplacent dans une région contenant deux à cinq fois plus de masse qu'il n'y en a dans les amas eux-mêmes. La densité de l'univers serait alors très proche de la densité critique, en dessous de laquelle un univers est en expansion éternelle, appuyant ainsi un préjugé théorique en partie d'ordre esthétique.

Un autre intérêt de la matière noire a trait à la difficulté de comprendre sans elle comment se forment les galaxies. Le scénario en vogue suppose que de petites fluctuations initiales de densité croissent par instabilité gravitationnelle. Ces fluctuations laissent leur empreinte sur le rayonnement cosmologique à 3 degrés K, empreinte détectée par le satellite COBE qui implique une très faible amplitude initiale. Leur croissance est lente, tardive, et s'arrête quand l'univers est trop dilué : il semble impossible que des galaxies se forment dans un univers trop peu dense.

Il est tentant de supposer que les halos sombres des galaxies sont formés des baryons excédentaires parfois invoqués pour rendre compte des abondances des éléments légers dans le modèle du Big Bang. Mais pour qu'ils ne rayonnent pas comme le gaz ou les étoiles, ils doivent se trouver

sous une forme compacte, planètes, "naines brunes", ou trous noirs. Ces objets ne semblent néanmoins pas responsables de la matière noire à grande échelle,

Il pourrait alors s'agir de particules élémentaires interagissant très faiblement. Ces particules pourraient être des neutrinos du Modèle Standard, à condition que leur masse dépasse une dizaine d'eV, car leur nombre dans un halo est limité par le principe d'exclusion de Pauli. Cependant, une nouvelle particule élémentaire stable beaucoup plus massive semble préférable.

Une détection directe de matière noire serait certes plus satisfaisante que de multiples indices indirects. Si le halo sombre de notre Galaxie est rempli par des particules inconnues, une de ces particules arrivant sur Terre et traversant un cristal y produit une ionisation, une scintillation et un réchauffement détectables. Jusqu'ici, les expériences sont négatives, et elles sont reprises en améliorant leur sensibilité.

Si le halo est formé de naines brunes, et non de particules élémentaires, l'effet de mirage gravitationnel pourra les mettre en évidence, la naine brune amplifiant la lumière d'une étoile en passant devant elle. La probabilité d'un tel événement est malheureusement si faible qu'il faut surveiller un million d'étoiles tous les jours pour espérer en observer un par an. Plusieurs expériences en cours devraient permettre d'ici quelques années de trancher entre naines brunes et particules pour notre halo.

## 4 - LA DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Au niveau le plus fondamental, les forces entre particules de matière procèdent de l'échange d'un champ ondulatoire caractéristique de chaque interaction. Ainsi la force électrique entre particules chargées, décrite macroscopiquement par la loi de Coulomb, est en fait due au niveau microscopique



à l'échange de photons, particules résultant de la quantification du champ électromagnétique.

Des quatre interactions fondamentales connues, seule la gravitation échappe pour l'instant à cette description quantique qui devrait mettre en jeu une particule de spin 2, le graviton. Toutefois, avant même d'aborder cet aspect, il faut mettre en évidence le caractère ondulatoire du champ de gravitation.

D'après la relativité générale, les interactions gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière (graviton de masse nulle) tout comme les ondes électromagnétiques (photon de masse nulle). L'intensité de l'interaction gravitationnelle étant intrinsèquement très faible, les effets détectables de cette propagation doivent mettre en jeu des masses énormes en mouvement très rapide. Par exemple, un système de deux étoiles à neutrons en rotation émet des ondes gravitationnelles, ce qui induit, sa coalescence. Il a même été montré que la variation de la période du pulsar binaire, le PSR 1913 + 16, était compatible avec ce rayonnement d'énergie.

Il importe donc de mettre en évidence directement ce phénomène et d'en étudier les caractéristiques. Dans un premier temps, il s'agit de détecter l'arrivée de ces ondes, qu'il s'agisse d'un train d'oscillations (coalescence d'étoiles binaires, explosion d'une supernova) ou d'une oscillation de faible amplitude, mais permanente (étoile à neutrons asymétrique). Selon le cas, un dispositif de détection sensible ("antenne") peut être suffisant, mais en général la mise en évidence d'une bouffée d'onde nécessitera l'observation simultanée par deux antennes. La détermination de l'état de polarisation de l'onde (reliée au spin du graviton) exigera le fonctionnement d'au moins trois antennes. Enfin, à terme, la détection d'ondes gravitationnelles devrait ouvrir une nouvelle fenêtre d'étude de l'univers, un nouvel outil de l'astrophysique tourné vers les phénomènes cosmiques les plus violents.

Les antennes résonnantes réalisées à ce jour n'ont pas une sensibilité suffisante pour espérer dé-

tecter des signaux au-delà de notre galaxie. Un nouveau type d'antenne, basée sur une détection interférométrique, a été proposé, et les études de faisabilité montrent qu'il devrait être possible d'explorer des sources d'ondes gravitationnelles au-delà des amas de galaxies les plus proches avec une fréquence de l'ordre de 10 événements par an.

Le projet franco-italien VIRGO s'inscrit dans cette perspective. Des comités français et italiens ont reconnu la qualité scientifique du projet, son intérêt et sa faisabilité. L'évaluation technique définitive a eu lieu au printemps 1992 et le projet a été approuvé par le CNRS. La construction sur le site de Cascina, près de Pise, pourrait donc commencer en 1993.

VIRGO consiste en un interféromètre de Michelson ayant des bras de 3 km de long, contenant chacun une cavité de Fabry-Pérot pour porter le trajet d'équivalent de la lumière à plusieurs centaines de kilomètres. L'interféromètre est éclairé par un laser puissant et ultrastable, tandis que chacun des composants optiques de VIRGO est suspendu et isolé par des systèmes d'amortissement qui atténuent le bruit sismique par un facteur supérieur à  $10^{10}$  pour des fréquences au-delà de 10 Hz. La détection d'ondes gravitationnelles peut donc se faire dans une large gamme de fréquence, de 10 à 10 000 Hz typiquement. Il importe de souligner les impacts technologiques d'un tel projet dans la mesure où il faut améliorer les performances actuelles des composants disponibles sur le marché (par exemple, les supermiroirs).

Les physiciens français engagés dans VIRGO regroupent des compétences issues des quatre départements de physique du CNRS (IN2P3, SPM, INSU, SPI). Un effort important de recherche et développement est en cours, en collaboration avec d'autres groupes européens. L'approbation définitive de VIRGO en 1992 et le maintien d'un calendrier de construction rigoureux placeront la France dans une position très compétitive par rapport au projet américain LIGO décidé il y a quelques mois et avec lequel une collaboration scientifique devrait s'établir à terme.

## S - NOYAUX ET NUCLÉOSYNTHESE STELLAIRE

L'origine des divers éléments existant sur Terre ou dans la Galaxie permet de retracer notre lointain passé. Les éléments les plus légers (jusqu'au lithium) furent essentiellement formés lors des tous premiers instants d'existence de l'Univers, quand celui-ci était très dense et très chaud. Témoins uniques des conditions physiques prévalant à cette époque, ces restes de la nucléosynthèse primordiale constituent l'une des preuves majeures de la réalité du Big Bang. Le reste des éléments fut et continue d'être formé au centre des étoiles. Les réactions nucléaires mises en jeu sont la source de l'énergie émise par les objets stellaires et le moteur de leur évolution. Bien maîtrisées, elles permettent de comprendre le temps de vie fini des étoiles, d'écrire l'histoire de notre Galaxie : par exemple, elles fournissent l'une des déterminations de son âge et donc de l'âge de l'Univers.

Le concept général de nucléosynthèse est un carrefour de plusieurs domaines : la cosmologie (contrainte sur la densité baryonique de l'Univers), l'astrophysique théorique (description des sites où la nucléosynthèse a lieu), la physique statistique (processus de transport, dynamique des fluides astrophysiques), l'astrophysique observationnelle (mesure des abondances relatives des divers éléments) et la physique nucléaire (mesure des taux de réactions). Nos connaissances dans ce domaine se sont notablement enrichies depuis quelques années grâce au nombre croissant de chercheurs intéressés par ce sujet et aux liens étroits qui se sont noués entre la physique nucléaire et l'astrophysique. Cependant, les progrès importants déjà réalisés laissent encore sans réponse plusieurs questions dont l'étude, expérimentale et théorique, représente un des défis de la physique moderne. En effet, la vitesse de nombreuses réactions thermonucléaires dans des conditions astrophysiques variées reste mal connue. Leur détermination expérimentale rencontre d'énormes difficultés, soit parce que les énergies mises en jeu et les sections efficaces correspondantes sont extrêmement faibles (phase non explosive de l'évolution des

étoiles), soit parce qu'elles impliquent des noyaux instables (explosions stellaires). Un progrès substantiel en la matière ne peut être réalisé que grâce à un apport expérimental accru en utilisant des faisceaux d'ions radioactifs qui sont ou seront disponibles dans les années à venir.

Plusieurs expériences utilisant des faisceaux radioactifs, notamment au GANIL, ont déjà permis de mesurer la vitesse de la réaction  $^{13}\text{N}(p, \gamma) ^{14}\text{O}$ , réaction très importante en nucléosynthèse explosive et en particulier pour la compréhension des supernovae. Il est important de noter que le problème de la détermination de ces vitesses se pose différemment si les systèmes composés impliqués dans les réactions nucléaires possèdent des niveaux dont la densité est faible ou élevée. Dans le premier cas, un nombre restreint de réactions intéressantes peut être identifié. Par contre, dans le second cas, un très grand nombre de réactions peuvent intervenir dans la modélisation astrophysique. Une mesure directe des sections efficaces de toutes ces réactions ne peut être raisonnablement envisagée. Quelques réactions particulièrement importantes pourraient cependant faire l'objet des mesures spécifiques, tandis que des modèles appropriés avec des paramètres préalablement testés seraient **utilisés** pour les autres réactions.

Les collisions entre ions lourds constituent une méthode extrêmement riche de production de nouveaux noyaux dont la durée de vie brève ne permet pas l'observation directe sur terre. Leur étude en laboratoire fournit donc des informations uniques sur les conditions d'évolution des étoiles puisque, dans le cycle de combustion des étoiles, plusieurs centaines d'éléments instables participent à la fusion nucléaire.

## 6 - LA RECHERCHE DU PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS

La chromodynamique quantique prédit que la matière hadronique à très haute densité (ou température) subit un changement d'état (ou transition

de phase) pour devenir un plasma de quarks et gluons déconfinés. Depuis quelques années, les expériences de physique des ions lourds essaient de mettre en évidence ce nouvel état de la matière en étudiant les collisions de noyaux lourds à grande énergie; les centres d'intérêt principaux de ces études sont :

- la mesure des propriétés des interactions entre hadrons dans un domaine de densité d'énergie correspondant à un volume de matière hadronique plus grand et de plus longue durée de vie que ce qui correspond à l'échelle hadronique fondamentale de 1 fm;

- la détermination de la nature et des propriétés de la transition de phase hadrons-quarks prédite par les calculs QCD sur réseaux et par divers modèles phénoménologiques;

- la mise en évidence de ce plasma quark-gluon, dans des conditions expérimentales proches de celles prévalant au tout début de la formation de l'univers.

Les différents modèles, à peu près en accord avec les calculs QCD sur réseaux les plus récents, indiquent une transition du premier ordre, peu marquée, entre la phase hadronique et la phase plasma dans laquelle les quarks et les gluons sont déconfinés. Cette transition de déconfinement se produit pour une température d'environ 150 MeV ou une densité d'énergie d'environ deux fois celle d'un proton. Enfin, le plasma de quarks et de gluons ne devient un plasma idéal (densité d'énergie valant trois fois la pression) que bien au-delà de la température critique, probablement deux fois cette température.

Les résultats précédents sont importants pour la physique de la matière dense apparaissant au cœur des étoiles à neutrons. La présence éventuelle de matière de quarks modifie en effet la masse maximale possible de ces étoiles et accélère leur taux de refroidissement par émission de neutrinos. Ils sont aussi importants pour la physique de l'univers primordial où des températures supérieures à

100 MeV apparaissent pour des âges de l'univers antérieurs à 10  $\mu$ s. Dans ce cas le passage de la ligne de transition quark-hadron peut avoir des conséquences observables sur l'abondance des éléments légers tels que D,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ . La nucléosynthèse de ces éléments dépend de façon critique des caractéristiques de la transition.

Ce champ de recherches est aujourd'hui devenu un pôle d'intérêt commun, non seulement pour les théoriciens (physique nucléaire, physique des particules, astrophysique et cosmologie), mais aussi pour les expérimentateurs de physique nucléaire et des particules.

De 1986 à 1990, une première phase exploratrice au CERN avec des faisceaux d'oxygène et de soufre a permis aux expériences de démontrer que des appareillages adaptés aux grandes multiplicités de hadrons produits dans des collisions de noyaux lourds sont capables de mesurer les observables intéressantes vis-à-vis du plasma quark-gluon. Des effets nucléaires cohérents et collectifs importants ont été observés; la plupart de ces effets sont prédits plus ou moins quantitativement par les modèles dans le cas de la Formation d'un plasma de quarks et de gluons, mais ils peuvent également s'interpréter dans un cadre plus conventionnel de physique multi-hadronique.

Le programme expérimental de physique d'ions lourds au SPS du CERN culminera en 1994 avec la production de faisceaux de plomb à 160 GeV/nucléon. Pour ce qui est de l'avenir à plus long terme, la construction d'un collisionneur noyau-noyau a été approuvée aux Etats-Unis : ce collisionneur fournira dès 1997 des collisions Pb-Pb à 200 GeV/nucléon dans le centre de masse, permettant d'atteindre des densités d'énergie de l'ordre de trois fois celle d'un proton. Finalement, à l'horizon de l'an 2000, le LHC du CERN, pourrait, s'il est approuvé, fournir des collisions Pb-Pb à 6 300 GeV/nucléon, permettant d'atteindre des densités d'énergies voisines de cinq fois celle du proton et donc d'espérer la production d'un plasma idéal de quarks et de gluons.



## 7 - VIOLATION DE LA PARITÉ EN PHYSIQUE ATOMIQUE : UN TEST OPTIQUE DE L'INTERACTION ÉLECTROFAIBLE À BASSE ÉNERGIE

Au cours de l'absorption de lumière polarisée par des atomes stables, il y a, en certains cas, brisure de la symétrie de parité. C'est ce qu'ont démontré des expériences d'optique spécialement conçues pour explorer finement cet effet. Le résultat s'interprète naturellement dans la théorie électrofaible comme une manifestation de l'interaction faible électron-noyau associée à l'échange de bosons neutres  $Z^0$ . La courte portée de cette interaction implique que l'asymétrie droite-gauche croît plus vite que le cube du numéro atomique  $Z$ . Les expériences les plus précises ont été faites sur le césium qui représente un bon compromis entre une valeur élevée de  $Z$  et la simplicité de la structure atomique. Pour extraire des données expérimentales la charge faible  $Q_W$ , qui joue vis-à-vis du boson  $Z^0$  le rôle de la charge électrique dans l'électrodynamique, on doit évaluer un facteur de structure atomique. Dans le cas du césium, l'incertitude ainsi introduite sur  $Q_W$  est maintenant inférieure à 1 % et les expériences en cours à Boulder et à l'Ecole Normale Supérieure se proposent d'amener l'incertitude expérimentale au-dessous de 1 %. D'un point de vue phénoménologique, la connaissance de la charge faible fournit une contrainte importante sur l'interaction violant la parité couplant les courants neutres électroniques et hadroniques. Cette contrainte est complémentaire de celle fournie par les réactions électron-hadron de haute énergie parce qu'en physique atomique, les quarks du noyau interagissent de manière cohérente avec le  $Z^0$ . Combinée avec la masse du  $Z^0$ , la détermination de  $Q_W$  fournit un test des corrections radiatives électrofaibles indépendant de la masse du top, dans le domaine des faibles transferts d'impulsion. D'où l'importance d'une détermination aussi précise que possible qui permettrait d'apporter des contraintes significatives sur les extensions du Modèle Standard.

Par ailleurs, des mesures effectuées sur deux composantes hyperfines d'une même transition doivent permettre d'identifier une interaction électron-noyau violant la parité qui met en jeu le spin nucléaire. Les forces nucléaires violant la parité produisent une distorsion chirale de l'aimantation nucléaire et l'interaction électromagnétique électron-noyau transfère à l'atome la violation de parité du noyau. Les effets attendus sont très proches de la limite de sensibilité actuelle et pourraient donc apparaître lors des mesures en préparation dans divers éléments lourds.

L'effet de violation de la parité est, même dans les atomes lourds, un effet minuscule se traduisant par l'existence d'un dipôle électrique de transition entre états de même parité. Pour augmenter la sensibilité, l'asymétrie droite-gauche est recherchée sur une transition rendue très interdite du fait des règles de symétrie de l'électromagnétisme. Ainsi, dans le cas de la transition 6S-7S du césium, l'émission spontanée dans la voie interdite correspondrait à une durée de vie de  $10^6$  secondes. Malgré l'emploi de sources lasers intenses, il en résulte un très sérieux problème de rapport signal sur bruit. On peut y pallier par des multipassages du faisceau dans la vapeur, mais la solution décisive consiste à appliquer un champ électrique statique permettant d'ajuster le degré d'interdiction, au léger détriment de l'asymétrie qui devient en pratique quelques  $10^{-6}$ . A la méthode initiale de détection utilisant la fluorescence se substituent maintenant, pour accroître la sensibilité des mesures, des méthodes d'optique non-linéaire ou bien de pompage optique nécessitant un ou plusieurs lasers de détection.

L'étude de ces transitions, ignorées jusqu'ici et riches en effets d'interférence, a aussi stimulé des méthodes nouvelles de calculs atomiques capables d'une évaluation précise des effets à  $n$ -corps. Ainsi ce champ de recherche, initié à l'Ecole Normale Supérieure, permet la réalisation d'expériences d'optique de très grande précision dont les résultats concernent non seulement la physique atomique, mais aussi la physique des particules et des noyaux.

## RECOMMANDATIONS

Dans le domaine des quarks-leptons, l'exploitation de LEP (et en particulier la montée à l'énergie nominale de 200 GeV) et de HERA doit permettre aux physiciens français de rester à l'avant-garde des découvertes possibles dans la décennie à venir. Pour le futur à plus long terme, le projet LHC ouvre des perspectives prometteuses, et la préparation du programme expérimental doit être activement soutenue. Pour garantir des possibilités d'expérimentation à plus haute énergie avec des collisions  $e^+e^-$ , il est essentiel de participer vigoureusement au R&D sur des accélérateurs linéaires, dans lequel des laboratoires français ont des compétences reconnues.

L'étude des hadrons continuera à se faire au CERN et à Saturne. La priorité est actuellement l'étude d'un projet d'accélérateur continu à électrons de 15 GeV qui devrait se situer au niveau européen. Des machines  $e^+e^-$  à très haute luminosité sont aussi envisagées comme "usines" à hadrons.

La continuation des études sur les noyaux repose actuellement sur l'exploitation de GANIL et la mise en service de multidétecteurs puissants comme INDRA et EUROGAM. Un axe important de développement futur concerne les faisceaux secondaires de noyaux exotiques jusqu'à 20-30 MeV par nucléon, pour lesquels des projets existent à GANIL et auprès de SARA.

En ce qui concerne l'étude de l'Univers, il importe de maintenir la diversité des approches, liée à la variété des objets d'étude et à celle des techniques, en particulier la complémentarité entre les expérimentations au sol et dans l'espace. Parmi des projets ambitieux et prometteurs, le VLT se distingue par sa dimension internationale (8 pays européens) et représente un tournant majeur en as-

tronomie. La compétition entre les états membres pour la maîtrise d'œuvre des détecteurs associés doit être prise en compte au niveau français par des mesures d'accompagnement appropriées.

L'émergence d'un nouveau domaine, l'astrophysique des particules, se confirme et doit être consolidée. Les thèmes étudiés (matière noire, neutrinos solaires, rayonnement cosmique) complètent ceux (nucléosynthèse) de l'astrophysique nucléaire dans la démarche de compréhension de l'Univers et des interactions fondamentales.

Le projet VIRGO de détection interférométrique des ondes gravitationnelles doit être soutenu fermement. Cette entreprise, par nature interdisciplinaire, pourrait aboutir à la première détection des ondes gravitationnelles et devrait être l'occasion de percées technologiques.

La grande vitalité de ce domaine de recherche et ses aspects les plus spectaculaires ne doivent pas faire oublier les problèmes plus domestiques : insuffisance des moyens généraux des laboratoires, locaux quelquefois inadaptés et équipement insuffisant en informatique distribuée, particulièrement en astrophysique. De manière plus générale, une politique informatique en moyens et en personnel, adaptée au traitement de la grande masse de données en astrophysique, devrait être définie en relation avec les projets instrumentaux.

Finalement, il est tout à fait regrettable que, malgré le discours officiel, il ne soit pas encore possible en pratique de porter la durée de la thèse à trois ans dans tous les domaines de la physique à cause de contraintes budgétaires. Nous jugeons essentiel que cette anomalie soit rapidement corrigée.

**Michel Davier**  
*Président du groupe 04*

# 05

## PLANETOLOGIE COMPAREE ET SYSTEME SOLAIRE

### AVANT-PROPOS

La planétologie recouvre des domaines très divers. En premier lieu, il s'agit d'explorer l'ensemble du système solaire, et d'en analyser l'extrême diversité. Cette phase, ouverte avec les premières missions planétaires au début des années 1960, est loin d'être terminée.

En second lieu, il s'agit d'élaborer un cadre théorique qui permette d'expliquer les phénomènes observés. Le concept de planétologie comparée prend alors tout son sens. A titre d'exemple, on peut mentionner ;

- planètes telluriques ; comparaison des structures internes, histoire et caractéristiques spécifiques du volcanisme et de la tectonique;

- planètes géantes ; structures internes, thermodynamique des fluides à haute pression, écarts à l'équilibre chimique, bilan énergétique, dynamique des anneaux;

- atmosphères planétaires : compositions élémentaires et isotopiques comparées à la composition solaire, circulation générale, processus de formation et d'échappement;

- surfaces des planètes internes, des satellites, des astéroïdes, et des comètes : formation et évolution comparées;

- interactions entre les corps planétaires et le milieu interplanétaire : magnétosphères des planètes géantes, ionosphères de Vénus et de Mars, environnement ionisé des comètes,

A partir de ces instigations, on se propose de :

- déterminer la composition et la physico-chimie de la nébuleuse solaire primitive, et élaborer un modèle global de formation du système solaire;

- reconstituer l'évolution des planètes, afin de comprendre l'origine des similarités et des différences observées entre les corps d'une même classe;

- approfondir les conditions d'apparition et de persistance de la vie, et comprendre pourquoi seule la Terre a préservé ces conditions jusqu'à nos jours;

- évaluer l'applicabilité de ces modèles à la formation et à l'évolution planétaire autour d'autres étoiles.

Dans les pages qui suivent, nous nous efforçons de donner un aperçu de la diversité et de la richesse conceptuelle de la planétologie. Nous met-



tons également en valeur l'effort de structuration et de regroupement de notre communauté, accompli ces dernières années autour de thèmes fédérateurs cohérents avec les grands programmes spatiaux en cours ou en projet. Cet effort a été rendu possible par la politique volontariste du CNRS et du CNES, et a abouti à la création d'un Programme National de Planétologie dans le cadre de l'INSU. Dans les *Perspectives et recommandations*, nous exposerons les conditions qui permettront à l'effort, engagé de porter pleinement ses fruits. L'action future du CNRS, en collaboration avec le CNES et le MEN, sera là encore décisive pour notre discipline.

## LES ENJEUX

### 1 - LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

Il est acquis que le système solaire résulte de l'effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz et de poussières à partir du milieu interstellaire. Cette contraction a été suivie très rapidement de la différenciation chimique de la nébuleuse solaire et de la formation d'une myriade de petits objets planétaires; ceux-ci se sont ensuite accrétés pour former les planètes internes. Dans le cas des planètes géantes, ce processus s'est poursuivi par l'accrétion d'une enveloppe gazeuse à partir de la nébuleuse. Dans le cadre de ce scénario, les processus responsables de la formation du système solaire tel que nous l'observons aujourd'hui restent cependant mal compris. Les développements actuels dans ce domaine ont deux objectifs majeurs :

- identifier le contexte astrophysique qui a conduit à la formation du système solaire, il y a 4,56 milliards d'années:

- comprendre l'enchaînement des événements qui se sont bousculés durant la première centaine de millions d'années : différenciation chimique de la nébuleuse solaire, ignition du soleil, accrétion des petits corps, planètes et satellites.

Deux approches sont mises en œuvre :

- l'observation de la formation de systèmes stellaires dans notre galaxie. Parmi les milliards d'astres similaires à l'étoile Soleil, on peut espérer observer des systèmes solaires semblables au nôtre, à différents stades de leur évolution. Le développement de cette démarche est lié à l'amélioration récente des moyens d'observation de l'astronomie en particulier spatiale;

- la recherche, dans le système solaire lui-même, des témoins des premières phases de son évolution chimique et dynamique. Sur le plan chimique, la composition globale des planètes et de leurs satellites reflète les gradients de composition chimique de la nébuleuse solaire. Sur le plan dynamique, il n'est pas possible, à partir de la situation actuelle de quasi-équilibre, de remonter dans le passé. La compréhension des processus de formation planétaire fait donc appel à l'étude des petits corps, qui ont évolué très rapidement, et ont préservé la mémoire des premiers millions d'années de l'évolution du système solaire.

Les comètes, riches en éléments volatils, représentent probablement les objets les moins évolués du système solaire. Les résultats des missions *Giotto* et *Vega* ont démontré la très grande abondance des éléments légers dans les grains cométaires. On peut espérer que des grains présolaires y aient été préservés. Une mission de retour d'échantillon de noyau cométaire, à l'étude pour le début de la prochaine décennie, pourrait ainsi servir de pont entre la planétologie et certaines préoccupations très actuelles de l'astrophysique (milieux froids, grains interstellaires). Les astéroïdes sont les derniers survivants des corps planétaires ayant participé à la formation des planètes telluriques. L'extrême diversité de ces objets démontre l'importance des processus de différenciation très tôt dans l'histoire du système solaire.

La très grande majorité des météorites et micrométéorites représente des fragments de ces petits corps (astéroïdes pour les météorites, comètes pour les micrométéorites); leur étude permet donc de caractériser la matière solaire primitive et d'obtenir des informations sur la formation et l'évolution interne de leurs corps parents.

## 2 - LES PLANETES ET LES SATELLITES

Les planètes du système solaire sont réparties en deux classes : planètes telluriques et planètes géantes. Cette distinction n'est pas seulement basée sur la différence de taille entre les deux types de planètes, mais recouvre également de profondes différences au niveau de leur composition, des processus de formation et d'évolution.

Les planètes telluriques, Mercure, Vénus, la Terre et Mars, auxquelles on rattache la Lune - par bien des aspects similaire à Mercure -, se sont formées par accréation de grains contenant des silicates, d'autres minéraux et des éléments volatils. Mercure et la Lune ne possèdent qu'une exosphère très ténue. Les trois autres planètes telluriques possèdent des atmosphères qualifiées de secondaires, car elles ne dérivent pas des gaz présents dans la nébuleuse solaire primitive, mais proviennent du dégazage de leurs grains constitutifs. Une autre hypothèse consiste à attribuer l'origine de ces atmosphères à l'apport en éléments volatils des impacts cométaires. L'évolution de ces atmosphères a été importante et divergente, comme en témoignent les conditions radicalement différentes qui prévalent actuellement pour Vénus, la Terre et Mars.

Les planètes géantes, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, ont conservé non seulement la composante solide, mais une partie des gaz constitutifs de la nébuleuse solaire primitive. Elles possèdent des noyaux composés vraisemblablement de silicates et de glaces, entourés d'une épaisse enveloppe gazeuse, où hydrogène et hélium dominant, et qui représente l'essentiel de la masse de Jupiter et de Saturne. La masse importante des planètes

géantes et la faible température de leurs atmosphères n'ont pas permis aux gaz, même les plus légers, de s'échapper comme pour les planètes telluriques. A l'exception d'Uranus, les planètes géantes possèdent une source d'énergie interne. Elles sont toutes entourées de systèmes de satellites que l'on a souvent comparés à des systèmes solaires en miniature. Titan, le plus gros satellite de Saturne, est atypique avec sa dense atmosphère d'azote, au sein de laquelle se forment en permanence des composés organiques complexes. On sait depuis peu que les quatre planètes géantes sont toutes entourées d'anneaux - caractéristique que l'on pensait réservée à Saturne - et possèdent des magnétosphères complexes. La planète la plus lointaine, Pluton, constitue un système double avec son satellite Charon, et se situe par sa taille entre Mercure et Mars. Son origine reste très mystérieuse : accréation tardive dans une nébuleuse en cours de dissipation, ou capture d'un objet extrasolaire.

### Structures internes et surfaces

La comparaison des caractéristiques physiques et chimiques et des types de tectonique des différentes planètes permet de mieux cerner les processus qui les ont fait évoluer jusqu'à leur structure actuelle. Cette démarche de planétologie comparée s'applique à des objets qui ont évolué dans des conditions physico-chimiques différentes, alors que la physique des phénomènes d'accréation, de transfert de chaleur et d'échange de matière entre les différentes unités est la même. Les différentes planètes sont autant de laboratoires expérimentaux dont l'observation permet d'étudier l'histoire de chacune d'entre elles et de mieux comprendre l'évolution du système solaire dans son ensemble.

Au nombre des questions importantes en Géosciences soulevées par les premières missions d'exploration du système solaire et que la planétologie comparée est susceptible d'appréhender au cours de la décennie à venir grâce aux missions en cours (*Magellan*, *Galileo*, *Mars Observer*), programmées (*Mars 94-96*, *Cassini-Huyghens*) ou envisagées (*Lunar Polar Orbiter*), on peut citer :

- les modes de formation des divers types de croûte planétaire : croûte primaire produite par chauffage accréctionnel et refroidissement conductif; croûte secondaire résultant de la fusion partielle du manteau; croûte tertiaire liée au recyclage de la croûte secondaire par des processus superficiels (fusion intracrustale, subduction, érosion);

- l'importance relative du volcanisme sur les planètes telluriques (par exemple, les volcans géants martiens du dôme de Tharsis, ou le volcanisme sur Vénus) à mettre en relation avec l'histoire thermique et les différents modes d'évacuation de l'énergie thermique;

- le rôle de Peau et du développement de l'hydrosphère vis-à-vis des différents types de tectonique observés (tectonique des plaques sur Terre, tectonique à une seule plaque, sur Mars et peut-être sur Vénus);

- la caractérisation quantitative de l'hydrosphère de Mars (distribution zonale et structure verticale) et de la structure interne de cette planète (dimensions et composition du noyau);

- la structure et la pétrologie de la croûte lunaire. Après la fin du bombardement ancien responsable des bassins d'impacts (4,4 - 3,9 milliards d'années), la Lune n'a pas subi d'importants processus superficiels (subduction, points chauds, orogénèse ou érosion) ayant pu induire des modifications majeures de la physico-chimie et de la structure crustale. La Lune constitue donc un laboratoire privilégié du point de vue des processus de formation d'une croûte primaire : différenciation verticale, intrusions magmatiques et plutonisme;

- l'explication de l'existence d'un champ magnétique d'origine interne sur Terre et de son absence sur Mars et Vénus;

- l'origine des différences de structure et de tectonique de surface des satellites Ganymède, Callisto et Titan, qui sont pourtant si proches par leurs caractéristiques globales de masse et de taille;

- l'évolution des conditions d'équilibre thermodynamique des surfaces au fur et à mesure de l'évolution des atmosphères planétaires.

Les enjeux scientifiques mentionnés ci-dessus se doublent d'enjeux technologiques portant sur les développements de techniques d'analyse à distance et d'instrumentations automatiques (analyse et collecte d'échantillons *in situ*, véhicules automatiques planétaires).

## Atmosphères planétaires

### Mars et Vénus

Malgré les nombreuses observations effectuées, plusieurs problèmes relatifs à l'aéronomie et à la circulation des atmosphères de Mars et de Vénus demeurent inexpliqués\*. On peut citer, par exemple, la super-rotation de l'atmosphère de Vénus, la chimie de ses nuages, la météorologie complexe et les échanges sol-atmosphère sur Mars.

Les mesures des rapports isotopiques ont démontré l'origine commune des atmosphères de Vénus, de la Terre et de Mars. L'interprétation des rapports isotopiques du Xénon et du Krypton demeure cependant controversée. L'échappement hydrodynamique et l'interaction avec le vent solaire puissant émis par le soleil jeune ont certainement joué un rôle décisif dans la composition des atmosphères primitives.

Il y a plusieurs milliards d'années, l'effet de serre maintenait des températures au sol sur Mars et sur la Terre suffisamment élevées pour que Peau y soit liquide. L'évolution des atmosphères a été totalement divergente sur Vénus, la Terre et Mars : l'atmosphère de Vénus est maintenant épaisse et torride, celle de Mars ténue et froide, et seule la Terre a préservé des conditions favorables au développement de la vie (voir *infra* "Exobiologie"). Modéliser les scénarios spécifiques à chacune des trois planètes est un enjeu fondamental de l'aéronomie planétaire.



Sur les planètes telluriques, auxquelles on peut ici ajouter Titan, l'enveloppe fluide est mince, et le flux interne négligeable devant le flux solaire. L'écoulement reste proche de l'équilibre hydrostatique, et les régimes de circulation observés, s'ils ne sont pas pleinement compris, sont cependant simulés de façon assez réaliste par les modèles numériques.

### **Les planètes géantes**

Les atmosphères des planètes géantes nous intéressent à deux titres principaux : leurs compositions et leur dynamique. Dans quelle mesure les atmosphères des planètes géantes, composées majoritairement d'hydrogène et d'hélium ont-elles une composition représentatives de celle de la nébuleuse solaire primitive ? C'est un problème posé de longue date, mais qui s'est extraordinairement affiné au cours de la dernière décennie, suite à l'exploration de ces objets, tant à partir des missions spatiales (*Pioneer*, *Voyager*) qu'à partir des observations télescopiques au sol utilisant des moyens de détection extrêmement sensibles.

Les atmosphères des planètes géantes proviennent de deux sources. L'une est le matériau gazeux de la nébuleuse, l'autre émane des grains immergés dans la nébuleuse et contenant des éléments volatils qui ultérieurement s'en échappèrent. La mesure de la composition élémentaire et isotopiques des couches externes pourrait permettre en principe la reconstitution des contributions des deux sources. En réalité, le problème est extrêmement complexe. Parmi les difficultés, on peut citer le changement de phase de l'hydrogène, qui passe de l'état moléculaire dans l'enveloppe externe à l'état métallique aux grandes profondeurs lorsque la pression devient de l'ordre de 2 millions de bars. Cette transition pourrait induire une discontinuité de composition pour l'ensemble des composants atmosphériques de Jupiter et de Saturne.

Sur les planètes géantes, l'enveloppe fluide s'étend sur une fraction importante du rayon planétaire. Ces enveloppes sont-elles convectives ? On

sait que Jupiter, Saturne et Neptune possèdent des sources d'énergie interne du même ordre que le flux solaire, qui pourraient suffire à engendrer une convection efficace; mais ce n'est pas le cas pour Uranus. Les mouvements convectifs complexes qui en résultent, et dont les images spectaculaires de Jupiter transmises par les sondes *Voyager* ne donnent probablement qu'une idée simplifiée, sont encore très mal compris. Les phénomènes de turbulence, particulièrement difficiles à modéliser, jouent vraisemblablement un rôle majeur. Un problème différent se pose pour les atmosphères supérieures des planètes géantes qui sont le siège d'une photochimie et d'un bombardement de particules intenses. C'est également le cas de Titan où se forment en permanence des hydrocarbures, des nitriles et peut-être des polymères.

### **Exobiologie**

Quels sont les processus qui ont permis à la vie d'émerger sur notre planète ? Certains de ces processus ont-ils pu se produire ailleurs, en particulier dans le système solaire ? Ces questions sont au centre des préoccupations de l'exobiologie. L'approche est extrêmement multidisciplinaire, comprenant l'étude de l'origine de la vie sur Terre, la recherche de vie ou de ses traces ailleurs dans l'univers, et l'étude de la chimie organique extra-terrestre. L'exobiologie fait donc appel à la chimie et physico-chimie (évolution chimique, chimie prébiotique) et à la planétologie (formation et évolution de la fluidosphère terrestre, comparaison avec les autres planètes telluriques, étude des petits corps et de la matière carbonée extraterrestre).

L'origine de la vie sur Terre apparaît comme l'aboutissement d'une rencontre entre deux ingrédients fondamentaux : matière carbonée et eau liquide. On suppose que les matériaux organiques présents dans le milieu terrestre primitif (formés *in situ* ou apportés de l'espace) par une longue évolution chimique se sont progressivement transformés en systèmes moléculaires capables de stocker une grande quantité d'informations dans leurs structures et de se répliquer. Ces structures étaient vrai-

semblablement constituées de macromolécules organiques analogues aux macromolécules biologiques actuelles, polypeptides et polynucléotides, mais plus simples.

L'étude des processus qui ont conduit à la formation de ces microstructures organiques et à l'apparition de la vie sur Terre est un des thèmes majeurs de l'exobiologie. Il nécessite de mieux comprendre l'environnement primitif terrestre, malgré l'absence de traces géologiques directes de cette époque, il y a environ 4 milliards d'années. La connaissance de l'environnement des autres planètes est aussi indispensable, soit pour y rechercher des traces de vie présente ou disparue, soit pour y étudier certains des mécanismes physico-chimiques dans lesquels interviennent des composés organiques, qui ont pu se dérouler sur la Terre primitive et dont la modélisation, théorique ou expérimentale est très souvent hasardeuse.

## Anneaux planétaires

Les anneaux planétaires se situent certainement parmi les plus intéressants des objets du système solaire pour le physicien et pour l'astrophysicien. Ils sont à la fois un exemple proche d'une classe d'objets particulièrement importants en astrophysique - les disques autogravitants - et un véritable laboratoire de dynamique gravitationnelle, au sein duquel la richesse de phénomènes observés et la complexité des mécanismes qui en sont la cause ont dépassé toutes les prévisions.

De nombreux objets de l'univers se présentent sous la forme de disques plats entourant un renflement ou bulbe (disques galactiques) ou un corps central (disques d'accrétion de certaines étoiles). Le système solaire lui-même est certainement né d'un tel disque, qui a dû se fragmenter pour former les cortèges de satellites des planètes géantes. On voit donc combien il est important de progresser dans la compréhension des mécanismes qui régissent l'évolution de tels disques pour déterminer un scénario plausible de la formation du système solaire.

Vus des télescopes terrestres, ces disques apparaissent très généralement comme des objets relativement homogènes, aux gradients peu marqués. Il en était de même des anneaux planétaires à la veille de leur exploration par les sondes *Voyager*, à l'exception d'un petit nombre de divisions visibles depuis la Terre, que les théoriciens pensaient avoir réussi à expliquer de façon satisfaisante. Les images à haute résolution et les occultations stellaires obtenues lors de la mission *Voyager* sont venues bouleverser ce champ de recherche dans les années 1980, en révélant une incroyable diversité de structures à toutes les échelles spatiales : bords très marqués, anneaux étroits confinés, parfois torsadés ou elliptiques, structure chaotique des anneaux, continus, présence d'ondes de densité. Alors que l'action conjuguée de la dynamique keplérienne et des collisions inélastiques entre particules faisait prévoir un étalement progressif de tout anneau étroit ou bord net, l'observation nous a imposé la réalité d'anneaux très étroitement confinés non seulement radialement, mais également en azimut. Prédits par une équipe française à partir d'observations d'occultation au sol, des arcs confinés en azimuth ont effectivement pu être observés autour de Neptune, et il semble bien que des objets de ce type, jusqu'alors passés inaperçus, se rencontrent également dans le système d'anneaux de Saturne. Ce sera l'enjeu des deux décennies à venir que d'arriver à comprendre ces phénomènes en termes de physique de base, et d'en tirer les conséquences pour une meilleure compréhension de la formation du système solaire.

## 3 - MAGNÉTOSPHERES ET INTERACTIONS AVEC LE MILIEU INTERPLANÉTAIRE

L'héliosphère ou atmosphère solaire est le milieu dans lequel sont immergées les planètes et les autres corps constitutifs du système solaire. La distance au soleil et la nature de la frontière, ou héliopause, qui sépare la zone d'influence du soleil du milieu interstellaire, sont encore mal connues.

Dans l'héliosphère, l'atmosphère solaire est en continuelle expansion. Les mécanismes de chauffage et d'accélération de ce "vent solaire", dans les régions proches du soleil, sont encore très mal connus. La turbulence magnéto-hydrodynamique dans la couronne et la convection et reconnection à partir de la chromosphère font partie des processus envisagés. L'étude de ces phénomènes ne peut s'effectuer que par télédétection, et nécessite une panoplie complète d'observations dans l'ensemble du domaine électromagnétique. Du point de vue théorique, ces études font appel à de nombreuses disciplines, en particulier la physique des plasmas, la physique atomique et la physique nucléaire.

Tous les objets du système solaire interagissent avec le vent solaire. Cette interaction présente une très grande diversité, selon la présence ou non d'un champ magnétique intrinsèque ou d'une atmosphère, l'intensité du champ de gravité et la distance au soleil. L'apport des missions spatiales a permis de déterminer la nature de cette interaction au moment de la rencontre. Il en ressort deux grandes classes : les corps possédant un champ magnétique intrinsèque (Mercure, la Terre, les planètes géantes), et ceux pour lesquels le champ magnétique est très faible ou nul (Vénus, Mars, les comètes). La frontière séparant l'enveloppe plasma du corps du milieu interplanétaire passe de quelques centaines de km pour Mars et Vénus à plusieurs rayons planétaires en présence d'un champ magnétique intrinsèque, et à quelques dizaines de milliers de rayons du corps central pour la chevelure des comètes.

Les thèmes d'études concernant ces interactions sont les suivants :

- La physique des transferts de masse, d'énergie et d'impulsion au travers de frontières très minces et d'interfaces magnétiques séparant les différents domaines, sur des distances comparables au rayon de gyration des ions. En particulier, dans le cas des corps magnétisés, on s'intéresse à la reconnection magnétique, à la viscosité turbulente dans des plasmas non collisionnels. Dans le cas des corps non magnétisés, la physique de la frontière et des

transferts dépend de l'altitude de pénétration du vent solaire, et la nature de cette frontière, encore très mal connue, varie avec les fréquences de collisions.

- La circulation générale dans les enveloppes de plasma, dont les sources sont l'interaction avec le vent solaire, les mouvements de l'atmosphère neutre, les interactions avec les satellites et les anneaux, qui peuvent apporter une contribution au plasma. La magnétosphère terrestre est entièrement contrôlée par l'interaction avec le vent solaire pour la partie la plus externe, et par la rotation terrestre dans les parties internes. La dynamique des zones dominées par le champ dipolaire est relativement bien connue, alors que celle des régions frontières l'est beaucoup moins. Pour les planètes géantes, la dynamique est largement organisée par la rotation planétaire, mais les mécanismes de redistribution radiale du plasma des sources internes, qui jouent un rôle important, sont encore très mal connus. On sait que Io est à l'origine du disque de plasma de Jupiter. De même, le disque de plasma de Saturne provient d'ions arrachés à l'atmosphère de Titan et de la diffusion vers l'extérieur du plasma formé au niveau des satellites de glace.

- L'échappement atmosphérique. L'atmosphère neutre de Mars et de Vénus, corps très faiblement magnétisés, est en contact direct avec le vent solaire, qui l'érode par arrachement des espèces atomiques telles que l'hydrogène et l'oxygène. Ce processus a vraisemblablement joué un rôle essentiel dans la diminution des réservoirs d'eau des planètes Mars et Vénus au cours de l'histoire du système solaire.



# EVOLUTION ET TENDANCES

## 1 - LA FORMATION DU SYSTEME SOLAIRE

La compréhension des processus de formation planétaire implique une approche pluridisciplinaire, à la fois théorique et expérimentale.

L'étude de la ceinture des astéroïdes vise à comprendre l'évolution de cette famille d'objets, à identifier les relations entre les différents types d'astéroïdes, entre astéroïdes et météorites, et à rechercher les liens éventuels avec les comètes. Les modélisations théoriques et numériques prennent en compte la dynamique des résonances, source à la fois du confinement d'objets primordiaux et du transport de matériau sur des orbites rencontrant l'orbite terrestre.

Le but de l'étude des comètes est de caractériser leur structure physique et chimique, ainsi que les relations avec la matière présolaire et les micrométéorites. Les modélisations concernent la composition et la chimie de la coma dont la compréhension est indispensable pour caractériser le noyau cométaire. Sur le plan dynamique, elles cherchent à relier l'évolution orbitale avec l'activité de dégazage du noyau, et à déterminer le site de formation des comètes.

Ces études sont basées sur les observations astrométriques pour les déterminations d'orbite et sur les méthodes de télédétection (spectrophotométrie, radar) pour la caractérisation des objets. La spectroscopie visible et infrarouge permet d'obtenir des informations sur la composition minéralogique des surfaces des petits corps. La spectroscopie dans l'ultraviolet et le visible des comètes est à la base des études de fluorescence des molécules complexes dans l'UV et de la photolumière des molécules en phase gazeuse. L'analyse de ces informations spectrales fait appel à la détermination en laboratoire

des propriétés spectroscopiques des constituants supposés et des analogues météoritiques. Les campagnes internationales d'observation fournissent le support essentiel pour la préparation des missions spatiales de rendez-vous avec des petits corps du système solaire, et, à plus long terme, les missions de retour d'échantillons.

L'étude en laboratoire de la matière extraterrestre primitive a montré la rapidité de la formation des premiers objets planétaires après l'isolement de la nébuleuse solaire du milieu interstellaire. Cette activité a été enrichie par l'apparition de nouvelles techniques de collecte : poussières prélevées dans la stratosphère et en orbite terrestre, collecte de météorites et micrométéorites dans les glaciers du Groenland et de l'Antarctique. La matière solaire primitive apparaît ne pas avoir été totalement homogénéisée lors de l'échauffement de la nébuleuse solaire. Aujourd'hui, ces études ont les objectifs suivants :

- caractériser chimiquement et isotopiquement cette matière primitive et identifier les grains présolaires qui auraient survécu, témoignant des événements nucléosynthétiques contemporains de la formation du système solaire;

- préciser les conditions d'accrétion des petits corps, les causes de leur évolution interne variée et précoce;

- retracer l'évolution dynamique des petits corps du système solaire depuis 4,5 milliards d'années.

## 2 - LES PLANÈTES ET LES SATELLITES

### Structures internes et surfaces

La première vague d'exploration du système solaire s'est terminée en 1989 avec le survol de Neptune et de ses satellites par *Voyager*. A l'exception de l'exploration plus poussée de la Lune, cette

phase a été essentiellement celle de la découverte géographique des surfaces planétaires par le biais de l'imagerie spatiale et de la photogéologie. La diversité et la richesse des observations réalisées, tout en faisant progresser la connaissance fondamentale, ont suscité de nombreuses questions qui interpellent aujourd'hui la communauté des Sciences de la Terre en ce qu'elles amènent à réévaluer, dans le cadre de la planétologie comparée, certaines de nos conceptions des processus majeurs contrôlant l'histoire géologique de la Terre et des planètes.

L'exploration des années 1990-2000 du système solaire peut être qualifiée de deuxième génération en ce sens que, d'une part, les questions clés ont été définies à partir de la phase de découverte qui a précédé, et que, d'autre part, elle bénéficie des moyens instrumentaux permettant de fournir des réponses quantitatives concernant l'état physico-chimique des surfaces (par exemple, la composition chimique et minéralogique de surface, la distribution du relief, la rugosité, ...). Les principaux outils d'investigation développés pour la télédétection des surfaces planétaires comprennent la spectrométrie gamma et X orbitale, la spectro-imagerie UV, visible et infrarouge et les techniques radar hyper-fréquences. La contribution française dans ce domaine est devenue très significative, en particulier pour la spectrométrie infrarouge tant au sol (observations de Mars et de la Lune) que dans le cadre des missions *Phobos* (premières observations à haute résolution des zones équatoriales de Mars) et, à moyen terme, *Mars 94-96*. Par ailleurs, la mission *Magellan* a fourni une imagerie radar complète de la surface de Vénus avec une résolution de 80 m, et une couverture altimétrique quasi globale de sa topographie (précision verticale 50 m, résolution moyenne 5 à 10 km), ce qui fait que l'on connaît mieux actuellement la surface de Vénus que celle de la Terre dont les 3/5 sont recouverts par les océans. Un satellite polaire lunaire à l'étude à la NASA pourrait permettre d'obtenir la première couverture globale de notre satellite avec les techniques modernes de télédétection.

Il est intéressant de souligner que l'approche suivie pour l'étude des surfaces planétaires est, à la différence des études menées jusqu'à récemment concernant la Terre, essentiellement globale. Compte tenu de la difficulté à obtenir des informations directes sur la structure interne, l'un des objectifs consiste à développer des méthodologies pluridisciplinaires permettant d'obtenir des contraintes sur la structure interne à partir des observations de surface (données topographiques et gravimétriques, géomorphologie et spectrométrie des cratères d'impact...).

Depuis la fin des années 1970, les principales informations sur la structure interne des planètes ont été apportées par le suivi des trajectoires des véhicules en orbite, qui a permis de déterminer le champ de gravité. On sait ainsi que les anomalies du champ de pesanteur de Vénus et de Mars sont fortement corrélées à la topographie, contrairement à la Terre. Les missions *Magellan* pour Vénus et *Mars Observer* pour Mars vont permettre d'améliorer notablement notre connaissance des champs de gravité et de la topographie des deux planètes (participation française sur *Magellan*). De même, un champ magnétique d'origine interne semble absent de Mars et de Vénus. La cause de cette différence marquante avec la Terre est importante pour comprendre l'origine et le moteur de la dynamo terrestre. La mesure d'un magnétisme rémanent pourrait permettre de fournir des indications sur l'existence d'un champ magnétique interne dans le passé à la surface de Mars.

Cependant, comme pour la Terre, c'est la sismologie qui permettrait de fournir les indications les plus précises sur la structure interne de Mars et de Vénus. En ce qui concerne Mars, les premières données fiables devraient être obtenues grâce aux deux stations géophysiques déposées lors de la mission *Mars 94-96*, dont le sismomètre est sous responsabilité française. Des projets à l'échéance 2000 (*Mesur - Marsnet* en collaboration ESA-NASA) pourraient permettre d'étendre le réseau et ainsi d'améliorer notre connaissance de la structure interne de Mars.

## Atmosphères planétaires

### *Mars et Vénus*

Les principales perspectives concernant les atmosphères de Mars et Vénus sont l'étude détaillée de processus physico-chimiques qui, par leur rôle majeur sur les composants mineurs de l'atmosphère, peuvent jouer un rôle important sur le bilan radiatif : les processus photo-chimiques, le rôle d'un volcanisme actif éventuel, et les interactions entre composants mineurs et aérosols. Ces préoccupations rejoignent les priorités concernant l'atmosphère terrestre, en particulier le cycle de l'ozone et le rôle des composants mineurs dans l'effet de serre. L'étude des atmosphères des planètes intérieures est donc particulièrement importante pour la planétologie comparée. Parmi les thèmes en développement, on peut citer :

- l'effet de serre sur Vénus, Mars et la Terre;
- les conséquences d'un volcanisme actif éventuel sur Vénus en ce qui concerne la composition de l'atmosphère supérieure, des nuages et des aérosols;
- les interactions gaz-aérosols dans les couches supérieures de l'atmosphère de Mars. Des expériences françaises embarquées sur la mission *Phobos* ont permis de caractériser ces aérosols de haute altitude, et d'étudier les variations de concentration de certains composants mineurs (ozone, CO). De nouvelles expériences, plus ambitieuses, dans lesquelles la communauté française est fortement impliquée, sont prévues pour la mission *Mars 94-96* ;
- le cycle de l'eau sur la planète Mars. Cette question est liée à l'évolution climatique ainsi qu'au problème de l'effet de serre. De nombreux indices suggèrent que l'eau sous forme liquide était présente à la surface de Mars il y a plusieurs milliards d'années. Les mécanismes d'échappement, et la présence de réservoirs d'eau sous la surface (périgélisol) représentent un problème majeur pour la planétologie comparée, mais aussi pour l'exobiolo-

gie. Les expériences de sondage électromagnétique prévues pendant la mission *Mars 94-96* devraient apporter des informations essentielles.

### *Les planètes géantes et Titan*

Notre connaissance de la composition des planètes géantes et de Titan a considérablement progressé au cours des dernières années, grâce au succès de la mission *Voyager* qui de 1979 à 1989 a visité les systèmes des quatre planètes géantes. On peut mentionner ici quelques découvertes particulièrement importantes, ainsi que les questions majeures qui restent posées.

En ce qui concerne les planètes géantes, on peut citer :

- Les variations de l'abondance d'Hélium dans les atmosphères extérieures de Jupiter et Saturne semblent résulter de la transformation de l'hydrogène moléculaire en hydrogène métallique. Les pressions nécessaires (1,5 Mbars) n'étant pas atteintes pour Uranus et Neptune, les rapports Hydrogène / Hélium qui y sont observés pourraient être proches de celui de la nébuleuse solaire primitive.
- Les éléments lourds et le Deutérium apparaissent de plus en plus abondants à mesure que l'on s'éloigne vers l'extérieur du système solaire.
- La circulation des atmosphères des planètes géantes est d'une extrême complexité et n'est pas encore comprise.
- La photochimie des atmosphères supérieures des planètes géantes et la chimie hors équilibre de leurs troposphères apparaissent beaucoup plus complexes que prévues. C'est ainsi par exemple que, contre toute attente, le monoxyde de carbone et l'acide cyanhydrique ont été détectés dans la stratosphère de Neptune par un groupe français.
- La planète Uranus apparaît complètement atypique comparée aux trois autres planètes géantes, du fait de l'absence d'une source d'énergie



interne significative que possède Neptune, de taille et densité voisine de celle d'Uranus.

-Jupiter pourrait présenter des oscillations similaires à celles observées pour le Soleil, Cette découverte, due à des groupes français, ouvre le champ nouveau de la sismologie des planètes géantes, qui devrait permettre d'accéder à leur structure interne.

Quatre thèmes fédérateurs émergent clairement des recherches récentes ; la formation des planètes géantes, l'étude de leur structure interne, la circulation atmosphérique des planètes géantes, la photochimie des couches atmosphériques supérieures.

Ces recherches ne pourront aboutir qu'avec l'apport d'autres disciplines, parmi lesquelles on peut citer la spectroscopie théorique et de laboratoire, la photochimie, la physique des hautes pressions, la physico-chimie des glaces et des grains, et la mécanique des fluides.

En ce qui concerne Titan, un grand nombre de travaux ont été effectués, notamment dans la communauté française, relatifs à l'étude de ce satellite dont l'exploration *in situ* sera faite dès 2004 par la sonde atmosphérique *Huyghens* actuellement en cours de réalisation sous la responsabilité de l'Agence Spatiale Européenne, dans le cadre de la mission *Cassini* en collaboration entre l'Europe et les Etats-Unis, Pour préparer cette mission, les thèmes suivants devraient être développés :

- étude de la composition de Titan à partir d'observations télescopiques dans l'infrarouge et le domaine radioélectrique,

- modélisation de la photochimie de son atmosphère,

- étude de la physico-chimie des aérosols, dont la compréhension est Tune des clés de l'aéronomie de Titan,

- modélisation de la circulation atmosphérique,

- étude de l'origine et de l'évolution de Titan.

Ces travaux font appel à la spectroscopie moléculaire de laboratoire, à l'étude en laboratoire des processus de photodissociation et des vitesses de réactions, à la simulation des formations de composés organiques complexes à la météorologie et la physique des nuages, à la thermodynamique des mélanges gazeux, et liquides et à la physico-chimie des glaces.

## Exobiologie

Initialement limitée aux problèmes liés à l'éventualité de la présence de systèmes vivants microscopiques sur la Lune, puis sur Mars, l'exobiologie a rapidement étendu son champ à l'étude de l'origine de la vie sur Terre, à l'étude de la nature et des possibilités d'évolution de la matière organique extraterrestre, et à la recherche de la vie en dehors du système solaire. Elle est devenue à présent un thème de rencontre entre astrophysiciens, planétologues, chimistes et biologistes.

Les premiers scénarios supposaient que les ingrédients de base de la chimie prébiotique terrestre se sont formés *in situ*, à partir des constituants de l'atmosphère chimiquement réduite. Les modèles actuels favorisent au contraire une atmosphère oxydée, composée majoritairement de CO<sub>2</sub> défavorable aux synthèses organiques. La tendance actuelle est de faire appel à d'autres sources, comme les événements sous-marins ou les comètes. L'intérêt porté aux apports cométaires éventuels provient de deux découvertes récentes : d'une part, le noyau cométaire apparaît beaucoup plus riche en matériaux organiques que ce que l'on supposait auparavant; d'autre part, les collectes en orbite ou au sol de microparticules extraterrestres indiquent que ces matériaux ont pu échapper à la pyrolyse lors de leur entrée dans l'atmosphère. Il convient à présent de mieux cerner la nature chimique des matériaux organiques ainsi apportés, et leurs possibilités d'évolution dans les conditions de l'espace et de l'environnement terrestre primitif. Dans ce domaine, deux approches complémentaires sont

développées : expérimentation au sol, à l'aide d'équipements lourds d'analyse chimique et physico-chimique, et simulations en orbite terrestre, dans le cadre des vols orbitaux de relativement longue durée. Le développement des missions cométaires, avec analyse chimique du noyau et, à plus long terme, le retour d'échantillons cométaires serait extrêmement important pour l'exobiologie.

Il faut aussi rechercher si certains des processus physico-chimiques qui ont eu lieu sur notre planète avant l'apparition de la vie ont pu se produire ailleurs. Là encore, cette approche est étroitement liée à la planétologie. On sait en particulier que l'eau liquide a vraisemblablement été présente à la surface de Mars il y a plusieurs milliards d'années. La vie aurait alors pu apparaître sur Mars, pour s'éteindre avec la disparition de l'eau de la surface. La perspective actuelle de l'exobiologie martienne est donc de rechercher des fossiles de cette vie éventuelle.

L'étude de la chimie organique dans les planètes extérieures est aussi un aspect nouveau de l'exobiologie. La chimie organique dans l'atmosphère de Jupiter et de Saturne fait intervenir des composés dont certains sont instables aux températures habituelles du laboratoire. La découverte récente de HCN dans l'atmosphère de Neptune, et les observations de la surface de Triton, où méthane et azote sont présents, renforcent l'idée de l'importance de la chimie des composés organo-azotés dans le système solaire extérieur. Certains des satellites de glace, principalement Europe, pourraient contenir de l'eau liquide dans leurs profondeurs, et intéressent les exobiologistes. Mais, parmi les corps extérieurs, c'est surtout Titan, où l'eau liquide est au contraire absente, qui est devenu leur premier objet d'étude. Le plus grand satellite de Saturne, avec une atmosphère dense, riche en composés organiques, apparaît en effet comme un véritable laboratoire de chimie prébiotique à l'échelle planétaire. Les travaux relatifs à la chimie de Titan, en particulier en relation avec la préparation de la mission *Cassini-Huyghens* sont une nouvelle composante de l'exobiologie.

## Anneaux planétaires

Après les survols de *Voyager*, la compréhension théorique des anneaux planétaires est apparue comme extrêmement limitée devant la diversité des phénomènes observés. La période qui va séparer la mission *Voyager* de la mission *Cassini* va donc être, et est déjà, consacrée à l'analyse intensive des données et au développement de simulation numériques ainsi que de théories explicatives, afin de préparer les observations de *Cassini* qui vont intervenir en 2004-2008.

L'effort observationnel se poursuit à travers l'analyse des données de *Voyager*, qui sont loin d'avoir été complètement exploitées, et l'utilisation de la technique des occultations stellaires depuis le sol, pour progresser dans la description des structures radiales et azimutales. Un apport essentiel des observations au sol est l'accès aux variations temporelles des anneaux, dont les images de *Voyager* ne nous ont fourni que des instantanés. Une opportunité exceptionnelle sera fournie par *Cassini*, qui permettra d'observer à haute résolution l'évolution dynamique des anneaux de Saturne pendant près de quatre ans, et d'effectuer la comparaison avec *Voyager*, sur une échelle de temps de plus de vingt ans.

Un effort théorique très important est actuellement entrepris par une communauté de spécialistes, en forte croissance depuis quelques années, au sein de laquelle les équipes françaises jouent un rôle particulièrement important. Cet effort de modélisation est effectué en synergie avec l'analyse des observations, au sein des mêmes équipes. Dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, la simulation numérique s'impose de plus en plus comme l'outil privilégié des travaux théoriques. Il faut, pour bien décrire l'évolution dynamique des anneaux, y représenter simultanément les collisions inélastiques entre particules de tailles très diverses, les déviations mutuelles des trajectoires des particules dans les rencontres proches, les résonances avec les satellites et les très grosses particules. Seul le développement de codes numériques lourds faisant appel soit à une description fluide en terme de

moments, soit à un très grand nombre de particules simulées indépendamment, permet aujourd'hui de progresser. Ceci n'exclut pas pour certains mécanismes un apport important des méthodes analytiques.

Les anneaux planétaires apparaissent également comme des systèmes couplés à leur environnement, Soumis à un bombardement météoritique qui induit une évolution à une échelle de quelques centaines de milliers d'années seulement, les anneaux sont également le siège de phénomènes électrodynamiques encore très mal compris, qui pourraient expliquer les "*spokes*", ou rayons, structures radiales d'albedo en rotation rigide découverts par *Voyager*? : Leur compréhension passe nécessairement par une étude des interactions entre les anneaux et les magnétosphères planétaires.

### 3 - MAGNÉTOSPHERES ET INTERACTIONS AVEC LE MILIEU INTERPLANÉTAIRE

A la suite de la mission *Voyager*, qui vient d'achever la première exploration des planètes lointaines, toutes les planètes du système solaire - à l'exception de Pluton -, trois comètes et un astéroïde ont reçu la visite d'une sonde interplanétaire. On possède donc au moins une image instantanée de la nature de l'environnement de chacun de ces corps et de leur interaction avec le milieu interplanétaire.

La prochaine décennie va apporter une connaissance approfondie, avec un suivi de l'évolution temporelle des phénomènes pour certains de ces objets : Mars avec les missions *Mars Observer* *Mars 94-96*; Jupiter, avec la mission *Galileo*; Saturne et son satellite Titan, avec la mission *Cassini-Huyghens*. Ces résultats pourront être corrélés avec les premières mesures effectuées dans le milieu interplanétaire en dehors du plan de l'écliptique (mission *Ulysse*). Des projets à plus long terme visent à explorer *in situ* les régions sources du vent solaire.

Ces missions donneront une nouvelle dimension à la planétologie comparée dans le domaine des environnements ionisés : jusqu'à présent, seule la magnétosphère terrestre avait pu être étudiée sur des périodes de plusieurs années.

L'environnement terrestre reste néanmoins le site privilégié pour l'étude des structures fines et des mécanismes de micro-physique. La mission *Cluster* de l'Agence Spatiale Européenne représente un pas décisif dans l'étude de la magnétopause terrestre. On comprendra ainsi beaucoup mieux les transferts de masse, d'énergie et d'impulsion dans les régions frontières, ce qui fera progresser l'étude de ces interfaces pour les autres corps planétaires. Parmi les projets à l'étude, on peut citer la mission *Freja*, consacrée aux processus auroraux terrestres, qui jouent également un rôle important sur Jupiter,

La compréhension des processus magnétosphériques passe par le développement de nouvelles études théoriques de physique des plasmas, qui requièrent le développement d'un potentiel important en matière de simulation numérique lourde.

Le GDR "*Plasmae*" joue un rôle central dans la coordination de l'ensemble des recherches sur les environnements ionisés dans le système solaire.

### 4 - LIENS AVEC LES TECHNIQUES DE LABORATOIRE

Les recherches planétologiques font appels aux techniques de laboratoire à divers niveaux :

- A un niveau fondamental, il s'agit de comprendre la physique des objets afin d'élaborer une théorie correcte, ou bien d'effectuer des mesures de laboratoire permettant d'interpréter les observations. Dans ce cadre, on peut citer la détermination des propriétés physiques et thermodynamiques des matériaux constitutifs des intérieurs des objets (par exemple, équations d'état pour les intérieurs de planètes, propriétés des matériaux constitutifs des noyaux cométaires), la cinétique des réactions chi-



miques d'intérêt aéronomique (chimie des réactions hétérogènes pour l'atmosphère de Mars, chimie des basses températures pour les atmosphères des planètes géantes et de Titan), les caractéristiques de l'interaction des surfaces planétaires avec les rayonnements électromagnétiques et corpusculaires (mesures des constantes diélectriques des sols, effets du bombardement ionique sur les surfaces). Une mention particulière doit être faite des caractéristiques spectrales des surfaces solides et des composés atmosphériques; il s'agit là d'un travail considérable, car la résolution spectrale et la sensibilité des techniques d'observations s'améliorent constamment, faisant apparaître de nouvelles signatures spectroscopiques. Pour interpréter ces données, il est alors nécessaire d'effectuer de nouvelles mesures des caractéristiques des raies spectrales (position, intensité, largeur, profil).

- Dans le domaine de l'analyse de la matière extraterrestre, les planétologues utilisent, à leurs fins propres, des instruments développés pour l'étude des Sciences de la Terre et la physique fondamentale (sonde ionique, microscope électronique à balayage ou à transmission). Une caractéristique spécifique de l'étude des échantillons d'intérêt planétologique est leur hétérogénéité à l'échelle du  $\mu\text{m}$ . Il faut également éviter toute contamination. Des techniques particulières devront être développées pour l'étude d'échantillons de Mars ou d'un noyau cométaire, dont la collecte est envisagée pour le début du siècle prochain.

- La préparation des observations futures requiert des travaux de physique de la mesure, pour mettre au point ou améliorer les techniques de télédétection, ainsi que les techniques de mesure *in situ* qui constituent l'une des priorités des futures missions planétaires. Ces recherches, qui impliquent le développement de détecteurs très sensibles, intéressent également l'astronomie et la radio-astronomie non planétaires.

## LA SITUATION

Le rôle de la communauté scientifique française dans le domaine de la planétologie n'a cessé de progresser, au point qu'elle se situe à l'un des tous premiers rangs au niveau international, derrière les Etats-Unis et à égalité avec l'Allemagne. La réunion en 1986 à Paris du congrès annuel américain, de la discipline, pour la première fois à l'extérieur des Etats-Unis, en témoigne. Cette situation privilégiée est pour une grande part imputable au rôle du CNES, seule agence spatiale nationale européenne à élaborer depuis plus de vingt ans une réelle politique scientifique spatiale, qui se dégage des colloques de prospective organisés tous les quatre à cinq ans. Le CNRS joue un rôle essentiel au niveau de l'analyse des données, de la simulation et des recherches théoriques, tant par ses laboratoires propres que par les laboratoires et équipes associées : 50 groupes de recherche et 160 chercheurs contribuent aujourd'hui à l'étude du système solaire, deux fois plus qu'il y a quinze ans.

Un autre élément très positif est le rôle important de la communauté scientifique française dans le domaine des observations au sol ou en orbite terrestre, qui se révèlent de plus en plus un complément essentiel des missions planétaires pour l'étude du système solaire : au sol, la sélection des sites et le développement de nouvelles techniques (imagerie CCD dans le visible et le proche infrarouge, interférométrie, optique adaptative) a permis, et va permettre, d'améliorer la résolution spatiale et la sensibilité. Dans l'espace, les observatoires existants (Hubble, IUE dans le visible et l'UV) et programmés (ISO, dans l'infrarouge) permettent de compléter les observations au sol dans des régions spectrales inaccessibles depuis le sol. On assiste à un développement des relations entre les observations au sol, en orbite terrestre, et lors des missions d'exploration du système solaire, que ce soit au sein d'une même équipe ou par des collaborations entre laboratoires. Cette évolution est à encourager, compte tenu des engagements importants de la France dans des programmes d'astronomie au sol (IRAM, CFHT,

VIT) ou en orbite (ISO), Cependant, le rôle des missions spatiales interplanétaires reste essentiel pour obtenir des informations *in situ*, des observations à très haute résolution et, à terme, des échantillons d'autres corps planétaires. Il est donc utile d'exposer la situation actuelle des grands programmes spatiaux d'exploration du système solaire à l'échelle mondiale.

Le programme planétaire de l'Agence Spatiale Européenne s'est développé à partir du succès de la mission *Giotto*, en mars 1986, qui s'est rapprochée à moins de 600 km du noyau de la comète de Halley. L'étape suivante, en 1988, a été la sélection par l'Agence Spatiale Européenne de la mission *Cassini*, consacrée à l'étude du système de Saturne, en collaboration avec la NASA. Les scientifiques français sont impliqués dans 12 expériences sur 17, tant sur la sonde de descente *Huyghens* (fournie par l'ASE) que sur l'orbiteur, sous responsabilité NASA. La communauté française est également très active dans la préparation d'une participation éventuelle de l'Agence Spatiale Européenne à un programme international d'exploration de la planète Mars, avec pour objectifs principaux la caractérisation de la structure interne et de la météorologie de Mars. Une perspective à plus long terme est constituée par la mission *Rosetta* de retour d'un échantillon de noyau cométaire, qui pourrait être lancée au début de la prochaine décennie. Dans le domaine de la magnétosphère terrestre et du milieu interplanétaire, la sonde *Ulysse* après avoir effectué les premières mesure *in situ* dans les régions de haute latitude magnétique de Jupiter, va survoler dans deux ans le pôle nord du soleil. Elle explorera ainsi les régions de l'héliosphère interne situées en dehors du plan de l'écliptique. Au niveau des perspectives, la communauté française a joué un rôle moteur dans la définition de la mission multi-satellites *Cluster*, qui permettra la caractérisation spatio-temporelle à petite échelle des frontières et des réservoirs de plasma de la magnétosphère terrestre. La charge utile sélectionnée pour cette mission comporte une contribution française très importante. C'est aussi le cas pour la mission *SOHO* dont un objectif majeur est l'étude de la couronne solaire et de son expansion.

Le programme planétaire de la NASA a pris un nouvel élan avec les lancements récents de *Magellan* (étude radar de Vénus), *Galileo* (orbiteur de Jupiter), et de *Mars Observer* (orbiteur de Mars), prévu à la fin 1992. Mentionnons également les survols d'Uranus, en 1986, et de Neptune, en 1989 par la sonde *Voyager*. L'implication de la communauté française dans ces missions se situe principalement au niveau d'une participation à l'analyse des données, où les équipes concernées se sont révélées tout à fait compétitives. La France a un rôle de premier plan en ce qui concerne la gravimétrie, tant pour Vénus (*Magellan*) que pour Mars (*Mars Observer*). Les perspectives à moyen terme sont dominées par la mission *Cassini*, en collaboration avec l'Agence Spatiale Européenne, consacrée à l'étude approfondie du système de Saturne et de son satellite Titan, qui devrait être lancée en 1997. A plus long terme, la NASA envisage plusieurs options pour pallier l'abandon de la mission *CRAF* de rendez-vous cométaire, qui crée une grave lacune au niveau de l'exploration des petits corps du système solaire. En parallèle, l'initiative "Exploration humaine" pourrait conduire à de nouvelles missions vers la Lune et Mars. Dans le domaine de l'étude de la magnétosphère terrestre, plusieurs expériences françaises ont été sélectionnées sur des missions NASA.

Le programme planétaire de l'URSS, relayé - il faut l'espérer - par la CEI ou la Russie, a été particulièrement actif pendant les années 1980. Les survols de la comète de Halley en 1986 par les sondes *Vega* ont permis une approche coordonnée avec la sonde européenne *Giotto*. L'étude de Vénus, dont l'URSS s'était fait une spécialité, s'est poursuivie avec les deux ballons déployés en 1985 par les sondes *Vega* et avec les missions de cartographie radar. Une nouvelle orientation a été donnée en 1989 avec la mission *Phobos*, qui constituait la première étape d'un programme très ambitieux d'exploration de Mars. Malgré la fin prématurée de la mission, des observations de télédétection et des études *in situ* tout à fait originales ont pu être effectuées pendant près de trois mois autour de Mars. Les équipes françaises ont participé très activement à ces missions par la fourniture d'expériences de

premier plan. La prochaine étape est constituée par le programme *Mars 94-96*, dont la France fournit une part importante de la charge utile. La mission 1994 a comme priorité la télédétection, et déploiera deux petites stations fixes, alors que le lancement de 1996 est consacré en priorité au déploiement d'un ballon développé par le CNES, qui se posera chaque nuit en des sites distants de plusieurs dizaines de km, et d'un petit véhicule mobile. Une évolution positive de la situation politique pourrait permettre d'envisager par la suite des missions encore plus ambitieuses (véhicule mobile lourd, retour d'échantillon de Mars). Dans le domaine des plasmas, la mission *Interball* pourrait effectuer dès 1993 des observations corrélées dans la magnétosphère terrestre.

Il est intéressant de noter que la très grande majorité des priorités définies par notre communauté au début des années 1980 est effectivement prise en compte dans les programmes en cours, ce qui démontre la cohérence et l'efficacité d'une approche à long terme dans le domaine spatial. Il faut cependant remarquer que la complexité et le coût croissant des missions planétaires en diminuent la fréquence. L'examen des niveaux d'implication français fait apparaître trois missions d'importance vitale pour notre communauté dans les quinze prochaines années ; la mission *Mars 94-96*, la mission *Cluster* (1997-1999) et la mission *Cassini* (1997-2008). La remise en cause de l'un de ces trois programmes risquerait de perturber gravement l'équilibre du développement de notre discipline.

La période 1988-1992 a été marquée par l'accentuation des difficultés liées au manque de recrutement dans les laboratoires spatiaux. Le problème est particulièrement aigu pour les personnels techniques. La croissance des programmes expérimentaux, dans un contexte de stagnation des effectifs, conduit de plus en plus à recourir à des contrats à durée déterminée. Au niveau des chercheurs, les possibilités de recrutement sont très inférieures aux besoins, d'autant plus que la majorité des laboratoires sont implantés en région parisienne. Ce déficit risque de remettre en cause la position française au niveau du dépouillement de don-

nées - et donc du retour scientifique de missions spatiales comme *Cassini*, *Cluster* ou *Mars 94-96* - où elle est particulièrement bien placée. Ce problème est d'autant plus important que les volumes de données à traiter vont augmenter très fortement avec les missions programmées.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

La communauté planétologique française s'est peu à peu constituée et affirmée sur le plan international au cours de ces dernières années grâce à l'action volontariste d'une part de l'ATP Planétologie de l'INAG, puis de l'INSU, et d'autre part du CNES. Cette situation favorable a permis de proposer à l'INSU et au CNES, qui l'ont acceptée, la mise en place d'un Programme National de Planétologie (PNP) s'articulant autour de trois thèmes fédérateurs, sélectionnés en fonction des grands programmes spatiaux en cours ou en projet : l'exploration de Mars, l'exploration du système de Saturne, la formation du système solaire (petits corps et matière extraterrestre).

Le PNP, qui fonctionne depuis deux ans, a déjà permis de soutenir des actions importantes, qui n'auraient pu aboutir dans le cadre de l'ancienne ATP, et a commencé à remplir sa vocation de structuration de la communauté planétologique française. Il faut cependant reconnaître que le PNP souffre pour l'instant de dysfonctionnements structurels qui limitent son efficacité. En effet, le budget du PNP est essentiellement alimenté - outre la contribution du CNES et celles, non récurrentes, du MRE et du MEN - par des financements provenant des trois divisions de l'INSU, qui sont rediscutés chaque année. Nous pensons que l'INSU, en tant qu'Institut National, a vocation à diriger des programmes pluridisciplinaires, traversant les divisions traditionnelles des sections du Comité National. Nous demandons en conséquence que le PNP, programme interdisci-



plinaire par excellence, dispose d'un budget propre à vocation pluriannuelle, sous la responsabilité directe du Directeur de l'INSU. Ce budget permettra notamment de soutenir les équipements mi-lourds propres à la planétologie et de renforcer la coopération avec les autres départements du CNRS.

Il est naturel que les laboratoires dits "spatiaux", habilités à passer des conventions avec le CNES, jouent un rôle moteur dans la préparation des missions spatiales et l'analyse des résultats. Le PNP a, en outre, vocation à soutenir les nombreuses équipes, qui, parallèlement aux missions spatiales, jouent un rôle essentiel et irremplaçable dans la prédiction et l'interprétation des données planétologiques, dont beaucoup ont été obtenues - et seront obtenues dans l'avenir - à partir de télescopes et de radiotélescopes au sol (IRAM, CFHT, VLT) ou en orbite (ISO).

Dans ce contexte, des actions volontaristes doivent être entreprises dans trois directions.

- **Modélisations** : des recherches approfondies doivent être entreprises ou poursuivies pour élaborer des théories de Formation et d'évolution des planètes, des satellites et des anneaux, mieux comprendre la structure interne des planètes telluriques et des planètes géantes, étudier l'évolution comparée des atmosphères planétaires, y compris celle de la Terre, la physico-chimie des nuages et des aérosols ainsi que la circulation, et examiner les interactions entre les corps planétaires et leur environnement ionisés.

- **Etudes en laboratoire** : spectroscopie des gaz et des solides (minéraux, glaces); mesure de cinétique des réactions chimiques; physique des hautes pressions; propriétés physico-chimiques des aérosols; simulation de synthèses organiques; développement des techniques d'analyse chimique, isotopique et structurale au laboratoire, en prévision des missions de retour d'échantillons de Mars ou d'un noyau cométaire.

- **Traitement de données** : la croissance rapide du volume de données que fourniront les mis-

sions spatiales prévues à moyen terme rend nécessaire une approche structurée du problème de l'archivage, du transport et de l'analyse des données spatiales en planétologie. Une stratégie concernant les réseaux haut débit doit être définie. En ce qui concerne le traitement, l'explosion des performances des stations de travail permet d'envisager une structuration en moyens très lourds (calcul vectoriel, connection machine) d'une part, et informatique répartie au niveau des équipes, d'autre part.

Le recrutement des chercheurs et des ITA indispensables au maintien du niveau de la planétologie française sur le plan international constitue le principal problème pour le développement de notre discipline.

En ce qui concerne les chercheurs, il faut noter que, ces dernières années, la quasi-totalité des embauches en planétologie au CNRS ont été effectuées par la section 14 (*Système solaire et univers lointain*), alors que de nombreux thèmes planétologiques sont très proches des préoccupations des Sciences de la Terre ou de l'étude des milieux fluides terrestres. Pour corriger cette anomalie, il serait souhaitable d'afficher des postes à vocation planétologique au niveau de l'ensemble du département "Sciences de l'Univers", afin que toutes les communautés scientifiques concernées puissent efficacement contribuer à la thématique hautement pluridisciplinaire que constitue la planétologie. Par ailleurs, les contributions à des objectifs planétologiques de chercheurs d'autres départements devraient être considérées positivement par les sections dont ils dépendent. La concertation entre les politiques de recrutement par le CNRS d'une part, le corps des astronomes et physiciens et l'enseignement supérieur d'autre part, est plus que jamais nécessaire. La régionalisation du recrutement dans l'enseignement supérieur risque d'affaiblir la cohérence d'une politique nationale de développement de la planétologie. Par ailleurs, le faible nombre de postes de maîtres de conférences créés en 1992 dans le domaine des Sciences de l'Univers suscite les plus vives inquiétudes pour l'avenir.

Le problème du tarissement de l'embauche des ITA est le talon d'Achille de la recherche spatiale en France, tant en planétologie qu'en astronomie. Les départs à la retraite prévus dans les dix prochaines années, et la forte attraction exercée par l'industrie privée sur des personnels hautement qualifiés risquent de vider les laboratoires spatiaux de leur potentiel technique, et ainsi de stériliser la recherche spatiale, si des remèdes ne sont pas trouvés.

Bien que cela soit en dehors des compétences directes du CNRS, il convient de souligner l'intérêt qu'il y aurait à ce que les Certificats d'Astronomie incluent un enseignement de Physique du système solaire. Nombre de chercheurs du CNRS en planétologie seraient disposés à y consacrer les quelques heures par an nécessaires.

Enfin, l'Europe est en train de s'édifier, non seulement au niveau économique et politique, mais également sur le plan scientifique. Dans ce contexte, il est important d'encourager la formation de réseaux de laboratoires, les échanges d'étudiants et de chercheurs, notamment au niveau post-doctoral, et de s'interroger sur les moyens de coordonner les actions scientifiques au niveau européen.

**Daniel Gautier**  
*Président du groupe 05*

*avec la collaboration de*  
*Yves Langevin*

# 06

## ORDRE ET COMPLEXITE DANS LA MATIÈRE

### INTRODUCTION

L'intitulé "Ordre et complexité dans la matière" succède à celui "l'ordre et le chaos dans la matière" du *Rapport de conjoncture* précédent. Cela reflète sans doute une réalité ; les concepts et méthodologies issus de l'analyse des phénomènes dits chaotiques dans les années 1970 se sont multipliés au point de constituer une véritable culture devenue la base des outils à présent disponibles pour aborder l'analyse de systèmes complexes, à très grand nombre de degrés de liberté. L'avènement de la notion de groupe de renormalisation a probablement constitué un tournant dans la pensée scientifique moderne en mettant l'accent sur une certaine invariance des lois physiques par changement d'échelle. Des outils comme l'analyse fractale et multifractale, les modèles de verres de spin d'où sont issues les techniques d'optimisation combinatoire (recuit simulé, automates cellulaires, réseaux de neurones formels), l'analyse en ondelettes, la théorie de l'homogénéisation, ... constituent un corpus de connaissances récentes indispensables, quelles qu'en soient les insuffisances actuelles, à celui qui veut entrer dans le monde de la complexité.

Si l'on définit la complexité comme une grandeur reliée à la richesse des possibilités offertes, on

constate que l'approche des systèmes complexes a fait surgir de nouveaux défis comme la maîtrise des structures hiérarchisées, où la séparation des échelles spatio-temporelles est de moins en moins nette, où la création de désordre à une échelle donnée peut être génératrice d'ordre aux échelles supérieures, où le nombre de niveaux d'énergie, ou modes couplés (en turbulence, dans les grosses molécules, les quasi-cristaux...) devient gigantesque, où les modes collectifs prennent une importance majeure et où apparaît la notion d'auto-organisation, qui implique celle d'évolution spontanée vers un certain ordre.

En biologie, ordre et complexité sont deux mots-clefs clairement liés au niveau de description choisi (moléculaire, cellulaire, celui des organismes ou des populations). Du point de vue du maintien de la fonctionnalité, il est clair que les systèmes sont de moins en moins sensibles aux perturbations de l'ordre au fur et à mesure que s'accroît leur niveau d'organisation. C'est ainsi que l'addition ou la délétion d'un seul nucléotide sur une molécule d'ADN peut entraîner des perturbations importantes - voire même être létale pour un organisme. A l'autre extrême, au niveau d'une population, la disparition d'un individu ou même d'un grand nombre d'individus peut n'affecter le fonctionnement de la population que dans une faible mesure. Cachée sous l'opposition apparente "ordre et complexité"



se dessine la dualité "information et redondance", la redondance apparaissant comme Tune des conditions préalables nécessaires à toute organisation, voire auto-organisation.

## LES ENJEUX

Il est remarquable que l'étude des systèmes complexes conduit souvent à des démarches scientifiques et des conclusions communes dans des disciplines aussi différentes que l'aérodynamique, la combustion, le génie des procédés, la géophysique, l'océanographie, la météorologie, l'astrophysique, la physique des matériaux et la biologie par exemple. Ces systèmes ont en général une évolution chaotique, notion que nous définirons par la propriété de sensibilité aux conditions initiales (SCI) : si deux réalisations du système ne diffèrent à un instant donné que par des différences infinitésimales, ces différences vont, sous l'effet de couplages non-linéaires, s'amplifier exponentiellement au cours du temps, pour atteindre des valeurs finies. C'est l'imprédictibilité des météorologues et des mécaniciens de la turbulence.

La SCI traduit le fait que l'information que Ton a d'un système s'évanouit au cours de son évolution : le système subit une perte de mémoire. Or cette mesure de la perte d'information est évaluée à une échelle donnée, souvent locale ou microscopique, pas nécessairement utile à la description de l'évolution du système dans son ensemble. On connaît en effet de nombreux systèmes dans lesquels certaines structures ont un caractère beaucoup plus persistant. Structures cohérentes ou organisées, spatiales et/ou temporelles, elles apparaissent à des échelles grandes, relativement à celles où se manifeste la perte d'information. Cette organisation n'est pas réductible à la simple superposition des éléments qui la composent et a engendré de nouveaux concepts. La dualité de l'existence de structures persistantes - traduisant un certain ordre - et du caractère chaotique de la description locale - correspondant

au désordre - est la vraie difficulté de l'approche des systèmes complexes, d'autant plus profonde qu'il n'existe pas à proprement parler d'échelle locale ou macroscopique mais plutôt une véritable hiérarchie d'échelles, dans laquelle une structure organisée peut elle-même entrer dans une évolution chaotique (par exemple la trajectoire souvent imprévisible d'un cyclone tropical). Dans ce contexte, seules se distinguent des autres l'échelle microscopique (inférieures à quelques Å), proche de l'échelle atomique et une échelle mésoscopique qualifiant celle à laquelle existe un équilibre local, où des grandeurs thermodynamiques ou statistiques peuvent par conséquent être définies (exemple : la particule fluide).

L'apparition de structures cohérentes résulte souvent de la croissance d'instabilités et conduit à une distribution intermittente de fluctuations intenses, qui n'occupent souvent qu'une infime portion de l'espace. Dans un milieu naturel, où existent toujours de petites perturbations de nature aléatoire, ces structures cohérentes se développent de façon apparemment contingente à partir des modes les plus amplifiés. La compétition entre ces divers modes peut aussi conduire à l'apparition de réseaux de défauts résultant d'un compromis entre deux interactions contradictoires (frustration).

L'étude de ces instabilités et des structures organisées est intimement liée à celle de la géométrie du support des structures dissipatives (1). L'un des enjeux majeurs est de décrire l'évolution de ces structures, régie *a priori* par un très grand nombre de degrés de liberté, en la réduisant à l'étude d'un système dynamique modèle à faible nombre de degrés de liberté. Cette approche, très riche en ce qui concerne les systèmes clos, rencontre des difficultés dans les systèmes ouverts. Une manière de réduire le nombre de degrés de liberté est le passage du microscopique au macroscopique. La théorie de l'homogénéisation, dans le cas où existe une bonne séparation d'échelles, permet de résoudre le problème.

(1) Elles sont appelées ainsi car il s'agit de l'ensemble des structures sur lesquelles se dissipe l'énergie fournie à un système hors équilibre thermodynamique, dissipation indispensable non seulement à leur création mais à leur maintien.

me du passage micro-macro, en mécanique des matériaux et des milieux poreux, par exemple. A la démarche dynamique visant à prédire de la manière la plus déterministe possible la formation et l'évolution des structures, se juxtapose également, comme nous le verrons, une autre démarche cherchant à construire ces objets de façon purement géométrique.

Il s'agit là du véritable enjeu théorique. Est-il possible de fonder la description d'un système complexe sur celle de ses structures organisées, oubliant finalement leur constitution fine ? Si oui, sur quel laps de temps peut-on s'affranchir du caractère chaotique de son évolution ? Dans quelle mesure les problèmes de la biologie rejoignent-ils ceux de la physique et de la chimie ? La clef réside dans la compréhension de l'organisation qui permet de réduire, à toutes les échelles où elle se manifeste, la complexité apparente.

Les enjeux de ces questions sont également d'ordre pratique et technologique. Le degré de sophistication des approches numériques de la turbulence est en partie dicté par ses applications dans nombre de domaines, en géophysique interne et externe, en astrophysique. En météorologie, il s'agit non seulement de pallier la perte de prédictibilité du temps mais de comprendre les phénomènes de transport (de polluants, par exemple) dans l'atmosphère. Les applications industrielles sont innombrables, notamment dans l'aéronautique, mais également en chimie (combustion turbulente, influence de la turbulence sur les taux de réaction). La maîtrise de l'interaction onde-matière désordonnée devient une nécessité tant pour le diagnostic de l'état de la matière que pour la compréhension de la propagation des ondes en milieu aléatoire (dans l'atmosphère terrestre par exemple, ainsi que dans la structure interne de la Terre), du transfert de rayonnement, et de l'optique non-linéaire. Dans un tout autre domaine, la nécessité accrue d'approfondir la relation "propriétés/structures" dans les matériaux est imposée par le haut niveau de performances exigé ainsi que la reproductibilité de ces performances à l'échelle industrielle et non plus celle du laboratoire. Le développement des techniques de caractérisation structurale a un impact déterminant

dans le domaine du contrôle non-destructif. Enfin, les enjeux technologiques liés à l'existence du chaos quantique semblent d'importance, comme son rôle dans les réactions chimiques (via la redistribution de l'énergie vibrationnelle des réactants) ce qui motive une activité croissante sur cette famille de sujets.

Les enjeux environnementaux et humains dépassent largement le domaine de la physique ou même de la biologie. Ils résident dans la compréhension et la maîtrise des phénomènes de régulation, c'est-à-dire l'aptitude d'un système complexe à rétablir son équilibre si des éléments extérieurs l'ont perturbé. Plus un système est complexe, plus il a de possibilités de restaurer un équilibre perdu. Dans bien des domaines, on découvre actuellement que des systèmes considérés comme simples sont en réalité régis par des paramètres qui définissent une multitude de sous-systèmes, à l'origine de la complexité nécessaire à leur auto-régulation. Par exemple, rien n'impose a priori que les compartiments subcellulaires soient obligatoirement toujours à l'équilibre interne; il se peut que sous l'effet des flux échangés, il s'y établisse des gradients dans la concentration de petits ions comme  $\text{Ca}^{++}$  qui jouent un rôle plus important que les concentrations moyennes dans des processus tels que les relations fonctionnelles entre organites subcellulaires ou la transduction de signaux.

## TENDANCES ET EVOLUTION DEPUIS 1989

Si l'on est aujourd'hui capable de dépasser l'approche purement perturbative (où l'on se contente de décrire révolution linéarisée autour d'un point d'équilibre, d'assimiler un milieu hétérogène à un milieu homogène doté de quelques défauts...), d'appréhender la multiplicité des échelles couplées, de suivre la croissance des instabilités jusqu'à la formation de structures, c'est en grande partie grâce à l'essor prodigieux, ces dernières an-

nées, à la fois des moyens d'analyse et d'observation et des capacités informatiques.

Les moyens d'analyse se sont enrichis de nombreuses méthodes de microscopie. A côté des approches traditionnelles de microscopie électronique et de diffusion de rayonnement, on a vu se développer les microscopies dites à champ proche qui permettent de visualiser des objets de taille inférieure au nanomètre (atomes, petites molécules). L'utilisation du rayonnement synchrotron permet de pénétrer la structure interne d'un atome ainsi que celle de son environnement. Les réacteurs à haut flux de neutrons permettent d'accéder à la structure magnétique des matériaux. Parmi les nouvelles voies ouvertes par ces techniques citons l'étude des phénomènes de surface (*e.g.*, transitions de phase et notamment les processus de fusion-cristallisation à deux et trois dimensions) et les déterminations de structures macromoléculaires complexes en particulier dans le domaine de la biologie. Les sciences du solide ont bénéficié de techniques de fabrication de composants si précises qu'il est désormais possible d'imprimer sur un substrat des signes dont la taille est de l'ordre de grandeur de quelques atomes. Elles permettent aussi d'envisager à moyen terme le traitement de l'information à une échelle proche de l'échelle atomique ainsi que la réalisation de moteurs mécaniques de taille submicronique. Dans les sciences de la Terre et de l'Espace, l'avènement de détecteurs très performants dans les domaines de longueurs d'ondes millimétrique, submillimétrique et infrarouge, installés sur de grands télescopes au sol ou spatialisés, permet à présent d'avoir accès à la structure de la matière dans l'Univers sur une plage d'échelles considérable. La mise en orbite de satellites scientifiques d'observation de la Terre, permet l'acquisition de données à un niveau sans précédent, également sur une vaste gamme d'échelles.

En ce qui concerne les moyens informatiques, rappelons simplement le rôle essentiel des ordinateurs tant pour la gestion des banques de données et leur traitement, que pour les simulations numériques qui atteignent à présent des degrés de résolution souvent supérieurs à ceux des données observationnelles et expérimentales auxquelles elles

sont confrontées (chimie organique, turbulence hydrodynamique, astrophysique). Des progrès remarquables ont vu le jour dans la modélisation des systèmes naturels complexes (modèles de climat, du cycle du carbone, de la chimie stratosphérique, de l'océan, de la magnétosphère, des atmosphères planétaires...). Ces modèles sont tous "opérationnels" ou sortent de leur phase de développement pour produire des résultats vérifiables par les données réelles à haute résolution. Ils deviennent ainsi des outils expérimentaux de plus en plus fiables pour étudier et comprendre les processus météorologiques et océanographiques. C'est ainsi que l'on comprend aujourd'hui comment l'injection dans l'atmosphère du gaz carbonique lié à l'activité humaine (déforestation, activité industrielle) crée une augmentation de la teneur de ce gaz qui excède largement les pics naturels observés durant le dernier cycle glaciaire, alors qu'en termes de flux, celui du CO<sub>2</sub> d'origine humaine n'est qu'une petite perturbation du flux naturel. Par ailleurs, la prédiction de l'erreur de prévision en météorologie opérationnelle fait l'objet de nombreuses recherches en France, et la communauté correspondante est certainement en pointe au plan international sur les problèmes concernant les méthodes variationnelles. Au niveau du traitement de l'information recueillie, il convient de mentionner les progrès et surtout la très grande versatilité des techniques de traitement d'images, (comment, par exemple, traiter des mesures lacunaires sur des champs dont la géométrie est fractale), de l'analyse multi-échelle, de la morphologie mathématique, de la stéréologie, et des techniques de reconstructions tridimensionnelles qui ouvrent des champs nouveaux.

Cet essor a grandement contribué à la mise en évidence des phénomènes d'intermittence, de localisation, du rôle des singularités, qui parfois déterminent à elles seules le comportement global et a ainsi ouvert des voies nouvelles dans la question du lien entre propriétés et structures. Le problème n'est plus de déterminer l'échelle de la structure dont semblent dépendre les propriétés macroscopiques, mais de traiter le fait qu'elles dépendent en général de structures présentes à toutes les échelles, avec couplage entre nombre d'entre elles.



En biologie, ces dernières années ont été marquées par un profond changement. On sait que les êtres vivants fonctionnent hors des conditions d'équilibre thermodynamique et que de ce fait leur comportement relève de la théorie des systèmes dynamiques. Si l'on trouve effectivement des effets d'instabilité et de structuration avec l'apparition fréquente d'oscillations à différents niveaux d'organisation possibles (prédateurs/proie, rythmes biologiques, ondes électriques dans le cerveau, agrégation des amibes, oscillations électriques membranaires, oscillations de la glycolyse...), force est de reconnaître que jusqu'ici ces approches n'ont pas produit d'avancée vraiment spectaculaire dans les modes d'étude et la compréhension des systèmes biologiques. Il n'est cependant pas évident qu'il en sera toujours ainsi.

La section suivante a été divisée en quatre parties, qui reflètent davantage la composition de notre groupe que l'existence de véritables concepts fédérateurs. Les deux premières parties sont consacrées, l'une à la théorie des systèmes dynamiques, l'autre à sa contrepartie quantique. Une troisième partie aborde les diverses manifestations de la complexité dans les matériaux, qu'ils soient ordonnés ou non, ainsi que l'impact des avancées dans ce domaine sur la biologie. La quatrième partie regroupe les phénomènes relevant plus de la complexité spatio-temporelle.

## SITUATION, THÈMES EN ÉMERGENCE

### - LA THÉORIE MATHÉMATIQUE DES SYSTEMES DYNAMIQUES

Issu pour la plus grande part des travaux de Henri Poincaré à la fin du siècle dernier, ce domaine des mathématiques a pour thème révolution asymptotique (sur un temps arbitrairement grand)

de systèmes régis par des équations différentielles et certains types d'équations aux dérivées partielles. Paradigme mathématique du déterminisme (Laplace), la théorie des équations différentielles a montré qu'il n'y a pas un rapport nécessaire entre l'affirmation théorique du déterminisme et la possibilité pratique de prévision : que ce soient les bifurcations de solutions dues aux singularités (Bousinesq, dont Thom retrouvera les intuitions dans sa théorie des Catastrophes) ou la dépendance sensible des conditions initiales due à la divergence exponentielle des solutions dans les systèmes hyperboliques (Hadamard, Poincaré, puis Birkhoff, Anosov, Smale, Bowen, Ruelle...), il ne s'agit pas d'une découverte récente bien que son impact sur les différentes disciplines appliquées le soit. Replaçant dans un cadre plus géométrique les résultats de la Mécanique Analytique (Lagrange, Hamilton, Jacobi, ...), les efforts théoriques de ce siècle ont conduit à un balisage du champ théorique par de grandes divisions qui le structurent : systèmes conservatifs (dont le type est la Mécanique newtonienne et l'avatar moderne la Géométrie Symplectique) *versus* systèmes dissipatifs (oscillations électriques, frottements, viscosités, où l'accent est mis sur les attracteurs et leurs bifurcations lorsque des paramètres varient), comportements elliptiques (mouvements quasi-périodiques des systèmes conservatifs complètement intégrables) *versus* comportements hyperboliques (divergence exponentielle des géodésiques sur une surface à courbure constante négative). Si l'on comprend raisonnablement bien aujourd'hui les comportements purs - mouvements quasi-périodiques (théorie de Kolmogorov-Arnold-Moser) pour les systèmes conservatifs proches des systèmes complètement intégrables. Dynamique symbolique et formalisme thermodynamique pour les systèmes uniformément hyperboliques (2), - il n'en est pas de même des dynamiques de systèmes réels qui présentent le plus souvent des comportements mixtes; si l'on excepte quelques exemples peu nombreux bien qu'historiquement importants (en particulier Julia et Fatou

(2) Bien que les moins sujets aux prévisions précises, ce sont les mieux connus au niveau de leur structure, ce qui rend bien mal taillé l'adjectif "chaotique" dont ils sont affublés.

pour l'itération des fonctions holomorphes et plus récemment l'application à ce problème des idées de renormalisation), on peut dire que c'est l'apparition de techniques permettant l'étude de ces dynamiques intermédiaires qui caractérise le développement récent de ce domaine, techniques topologiques et variationnelles dans l'étude de la dynamique très complexe des zones d'instabilité qui, dans les systèmes conservatifs à deux degrés de liberté, connectent les régions correspondant à des mouvements quasi périodiques, techniques surtout numériques dans l'étude encore balbutiante de la diffusion lorsque le nombre de degrés de liberté est supérieur à deux, techniques symplectiques dans la recherche globale de solutions périodiques et Sa découverte de phénomènes dynamiques inattendus qui ont fourni des contre-exemples à de vieilles conjectures (densité des solutions périodiques, hypothèse quasi-ergodique), techniques analytiques et de théorie ergodique dans l'étude des systèmes où la divergence des couples de solutions ne se produit pas de manière uniforme (systèmes non uniformément hyperboliques, en particulier résultats sur les attracteurs de Hénon qui sont bien des attracteurs !), techniques de chirurgie en dynamique holomorphe et en particulier dans la spectaculaire réciproque du théorème de Siegel sur la conjugaison à des rotations des germes holomorphes, techniques de type hamiltonien dans l'étude des bifurcations complexes, techniques de fonctions résurgentes dans l'élucidation des phénomènes à plusieurs niveaux - en particulier résolution de la conjecture de Dulac sur les champs de vecteurs polynormiaux du plan - et techniques d'analyse non standard dans l'étude de phénomènes métriques tels que canards, fleuves, retard à la bifurcation.

L'image qui se dégage de beaucoup de ces travaux est bien proche de celle décrite par Thom, à savoir la coexistence d'ordres locaux à diverses échelles, immergés dans un bain complexe dont la description ne peut être qu'incomplète. Il ne faut pas croire cependant que les comportements extrêmes ne fassent plus l'objet de recherches actives. Les idées hyperboliques envahissent actuellement de nombreux domaines ainsi qu'en témoigne la

théorie des groupes hyperboliques; quant aux notions elliptiques, elles débouchent plutôt sur la géométrie algébrique : groupes quantiques, théorie des champs. Enfin de nombreux travaux concernent le passage à un nombre infini de dimensions : mouvements quasi-périodiques à une infinité de fréquences, variétés inertielles et attracteurs des équations aux dérivées partielles d'évolution, turbulence.

Un test intéressant de la santé d'un domaine est sa capacité à résoudre les problèmes qui ont motivé sa fondation. La mécanique céleste est en grande partie à l'origine de la théorie mathématique des systèmes dynamiques, et il est rassurant de voir que plusieurs questions importantes ont été résolues récemment ; existence de solutions sans collision du problème newtonien des cinq corps dans l'espace dans lesquelles certains des corps partent à l'infini en un temps fini, exhibition de comportement finaux complexes dans le problème de trois corps dans le plan, élucidation de la topologie des variétés intégrales du problème des N corps dans l'espace. Au niveau des applications, la mécanique céleste est également à l'honneur avec la découverte récente du fait que le système solaire n'est vraisemblablement pas sur une solution quasi-périodique des équations de Newton mais plutôt dans une zone d'instabilité. La prédiction de la trajectoire des petites planètes (dont fait partie la Terre) est impossible, ceci, précisons-le, à l'échelle de la centaine de millions d'années. Un autre succès de la mécanique céleste est l'étude de la dynamique des différents types de résonance, dont la ceinture des astéroïdes et du chaos associé. Ces études explicitent les mécanismes de transport des météorites et comètes sur des orbites observables, Enfin, la qualité des observations astrométriques permet de mesurer avec une précision croissante les orbites des planètes en confortant ainsi les simulations numériques.

## 2 - CHAOS QUANTIQUE

La théorie du chaos dynamique décrite au paragraphe précédent ne peut s'appliquer à un système de la taille du nanomètre. À cette échelle en

effet la Mécanique Classique perd sa validité au profit de la Mécanique Quantique. La quantification produit l'apparition d'une constante physique, la constante de Planck, véritable "échelle" au-dessous de laquelle le caractère ondulatoire de la matière se révèle et conduit à sa stabilisation dans son évolution au cours du temps. Il n'y a donc apparemment plus de place pour du chaos temporel dans de tels systèmes. Le terme de chaos quantique est d'autant plus surprenant que l'équation de Schrödinger est linéaire. Les édifices comme les agrégats, les molécules, les atomes, les noyaux ou les électrons dans les solides peuvent néanmoins présenter du chaos en raison de leur complexité intrinsèque ou de celle de leurs interactions. La question est de savoir comment caractériser ce chaos. C'est en fait dans les propriétés du spectre d'énergie que le chaos se révèle dans les systèmes quantiques. En effet, le comportement chaotique d'un édifice classique apparaît dans son évolution à long terme, Or l'évolution temporelle d'un édifice quantique est entièrement connue si on connaît son spectre d'énergie. C'est donc dans les propriétés spectrales qu'il faut chercher la trace du chaos éventuel.

On peut dire aujourd'hui qu'un système quantique est chaotique lorsque son spectre d'énergie est très sensible aux fluctuations des paramètres physiques (champ électrique ou magnétique, constante de force de liaison, masses effectives...) qui caractérisent sa dynamique. Cette sensibilité se traduit par une propension du spectre à exhiber un grand nombre de croisements de niveaux, sous l'effet, d'une petite variation de ces paramètres. Ces croisements sont en fait évités par l'existence d'interactions petites mais suffisantes pour les interdire. Dès lors, le repérage des états au moyen de nombres quantiques perd toute signification. Ce sont en revanche les propriétés statistiques du spectre (fluctuations de densité des états, corrélations entre niveaux voisins, distributions des écarts de niveaux) qui, parce qu'elles restent peu sensibles aux variations des paramètres physiques, deviennent des quantités pertinentes à considérer dans une confrontation avec l'expérience.

Trois types d'outils et d'approches conceptuelles ont été développés dans ce but depuis les années soixante-dix. Tout d'abord, la théorie des matrices aléatoires, dont l'origine remonte aux années cinquante avec les travaux de Wigner en Physique Nucléaire. Cette théorie prédit un comportement universel de la distribution des écarts de niveaux, permettant de discriminer entre différents types de comportements classiques sous-jacents. Elle fournit en outre des tests très commodes pour la détection des effets de chaos dans un système quantique dont on ne connaît pas grand chose par ailleurs. Ensuite, la théorie de Gutzwiller, développée à l'occasion du calcul des spectres d'impuretés dans les solides, et de Balian-Bloch, développée pour le calcul des modes normaux d'une onde (acoustique ou électromagnétique) dans une cavité, permet de relier la distribution des niveaux d'énergie à celle des orbites classiques du modèle classique associé. Enfin, la théorie de la localisation dynamique, spectaculairement illustrée dans l'expérience de Bayfield et Koch concernant l'ionisation des atomes d'hydrogène par des champs micro-ondes, et issue d'une analogie avec la localisation d'Anderson de la Physique des Solides, permet de comprendre pourquoi et comment les systèmes classiques, exhibant de la diffusion dans l'espace des phases, sont localisés par effet d'interférence quantique.

Du chaos quantique a été observé dans de nombreux systèmes physiques. La plus ancienne expérience concerne les spectres de résonance des noyaux atomiques. L'ionisation des atomes simples par un champ micro-onde a par ailleurs constitué un élément essentiel dans la mise au point des outils théoriques. Les petits atomes (hydrogène, lithium) dans des états de Rydberg en champ magnétique, les petits agrégats métalliques, certains modes dans de petites molécules, le mouvement des électrons dans des anneaux métalliques désordonnés de la taille du micron, exhibent aussi un caractère chaotique que la théorie des matrices aléatoires permet d'expliquer. Tout récemment, des tests de cette théorie ont permis de mettre en évidence l'apparition de chaos quantique dans les propriétés électroniques des quasi-cristaux. Bien qu'on ne sache encore ni l'origine de ce chaos, ni ses



conséquences physiques, les propriétés étranges de ces alliages métalliques quant à leur conductivité pourraient bien être une conséquence, entre autres, de l'existence d'un spectre chaotique pour les niveaux d'énergie du gaz d'électrons. Enfin, les mêmes tests ont permis de mettre en évidence du chaos dans les modèles qui servent à décrire la supra-conductivité à haute température. Là encore, cependant, nul ne sait encore quelle est l'origine du chaos, ni quelles en sont les conséquences éventuelles sur les propriétés étranges de ces matériaux supraconducteurs qui sont pourtant des isolants dans la phase de haute température.

Parmi les effets surprenants du chaos quantique, citons l'exemple des "cicatrices". Ce sont des états quantiques stables qui correspondent classiquement à un état d'équilibre instable. Un peu comme si les interférences quantiques parvenaient à maintenir en position verticale un parapluie posé sur le sol. Cet effet a été observé lors de l'éclairement d'un atome par un laser puissant. Alors qu'à faible puissance l'atome ionisé par le laser convenablement réglé ionise l'atome, elle peut dans certaines conditions le restaurer à forte puissance au lieu de le faire exploser.

Enfin, et ce n'est pas l'aspect le moins étonnant du chaos quantique, il se pourrait qu'il soit la clé pour la preuve de très anciennes conjectures mathématiques, comme la fameuse hypothèse de Riemann, les méthodes utilisées en chaos quantique étant applicables à ce problème.

Malgré les progrès réalisés encore tout récemment à la fois du point de vue de l'outil théorique et de la mise en oeuvre expérimentale, on ne peut pas dire que le chaos quantique constitue une véritable théorie. Il s'agit encore pour l'instant d'un ensemble de prescriptions où la phénoménologie tient une large place. De plus les conséquences du chaos dans les systèmes quantiques sont loin d'avoir été toutes explorées.

### 3 - ORDRE ET COMPLEXITÉ SPATIALE

#### **Matière condensée : amorphes, quasi-cristaux, structures incommensurables**

Le problème posé par ces structures est la recherche d'algorithmes locaux, déterministes et de complexité finie (c'est-à-dire exprimables en un nombre fini de phrases ou par un algorithme comportant lui-même un nombre fini de lignes de programme) de propagation de l'ordre à grande distance. Une illustration, hors du domaine de la matière condensée, en est la surprenante organisation en structures spirales des fleurons du tournesol, compréhensible à partir de la suite de Fibonacci.

L'ordre et le désordre en physique de la matière condensée sont gouvernés par le paradigme de l'ordre cristallin, et donc des groupes de symétrie cristallographiques. Depuis plusieurs années l'étude des amorphes puis des quasi-cristaux a renouvelé le concept d'ordre. La géométrie dans des espaces plus complexes que l'espace usuel à trois dimensions a permis d'élargir la notion d'ordre et de défauts. Ainsi les amorphes, mais aussi les cristaux liquides (amphiphiles <sup>(3)</sup>) et les cristaux d'alliages métalliques à grandes mailles ont été décrits à partir d'espaces courbés. Les structures idéales sont ensuite "décourbées" par des défauts de rotation (disinclinaisons) qui rétablissent la topologie de l'espace usuel. Dans l'espace de plus grande dimension, la structure est simple : la complexité n'existe que sur la projection dans l'espace usuel.

Ces défauts sont ordonnés dans le cas des cristaux complexes (cristaux de défauts), ou désordonnés dans un amorphe. Les quasi-cristaux font appel à des espaces euclidiens de plus grande dimension que l'on coupe et projette ensuite sur l'espace usuel à trois dimensions. Toutes les symétries de l'espace de grande dimension ont une contrepartie dans

(3) Liquides constitués de molécules comportant une partie polaire et une chaîne hydrocarbonée aliphatique.

l'espace usuel, introduisant une richesse débordant la cristallographie classique.

La part de la géométrie est donc très importante dans ce type d'études. Les interactions physiques qui gouvernent les structures s'intègrent bien à cette approche : une façon de voir les contraintes consiste à laisser s'échapper la matière dans des dimensions supplémentaires. La théorie des défauts dans la matière s'est ainsi enrichie de nouveaux concepts.

## La chimie supramoléculaire

Les chimistes s'intéressent de plus en plus à des systèmes plus complexes que ceux couverts par l'étude des espèces moléculaires isolées. Ces systèmes supra-moléculaires résultent des interactions qui amènent deux molécules ou plus à se reconnaître et à s'associer pour donner naissance à des assemblées présentant des propriétés nouvelles.

Ces associations sont caractéristiques d'une sociologie moléculaire de couple (complexe - ou supermolécule - "invitant + invité", à nombre limité de molécules) et/ou d'une sociologie moléculaire de groupe (agrégats moléculaires : micelles, cristaux liquides, films de Langmuir-Blodgett <sup>(4)</sup> "métallurgie" des mélanges polymères-copolymères, etc.). Dans ces deux cas, ce sont des interactions non covalentes (interactions hydrophobes, liaison hydrogène...) qui déterminent ces structures supramoléculaires.

On peut illustrer de quelques exemples le parti que l'on peut tirer d'une connaissance détaillée de ces interactions : cristallisation bidimensionnelle de protéines qui permet d'analyser plus facilement leur structure, élaboration de composants moléculaires (fils, canaux moléculaires), phases condensées dont l'organisation résulte d'une reconnaissance moléculaire spécifique du type "bases nucléiques".

(4) Couches monomoléculaires à la surface de l'eau que l'on peut transférer et empiler sur des lames de verre par simple traversée de l'interface.

## Les cristaux liquides

Il pourra paraître paradoxal que, dans un rapport de conjoncture où les enjeux, les tendances et les perspectives doivent constituer la substantifique moelle de l'analyse souhaitée, nous nous attardions sur les cristaux liquides dont la découverte fut (comme bon nombre de découvertes) tout à fait fortuite. En effet, ces phases liquides anisotropes chères aux physiciens et aux chimistes ont été mises en évidence par hasard et par un zoologiste, à la fin du siècle dernier, et les planificateurs, s'ils avaient existé à l'époque, auraient été bien en peine de subodorer l'éclosion de telles fleurs.

Une fois reconnues, ces phases organisées, à la fois liquides et biréfringentes, ont contraint les physiciens à admettre que la matière pouvait revêtir des formes intermédiaires entre l'ordre cristallin tridimensionnel et le liquide banalement isotrope. C'est au cristallographe français Georges Friedel que l'on doit, dans le courant des années 20, la première classification des états mésomorphes de la matière, ou mésophases.

Grâce aux travaux de chimistes pionniers comme Vorländer et, plus tard, Gray, on a compris que l'existence des mésophases était étroitement liée à une anatomie moléculaire particulière. C'est pourquoi les chimistes et les physiciens qui s'intéressent à ce type de sociologie moléculaire, ont toujours travaillé en étroite collaboration et la communauté française compte à son actif de nombreuses découvertes, un certain nombre de brevets et une reconnaissance internationale prestigieuse : le prix Nobel de physique attribué en 1991 à P. G. de Gennes, un des grands spécialistes de ces matériaux si singuliers.

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous pouvons souligner quelques directions de recherche très actives aujourd'hui en France,

Les cristaux liquides lancent au chimiste plusieurs défis. Il s'agit tout d'abord de comprendre de quelle manière la structure et la symétrie moléculaires décident de l'existence des mésophases, de

leur organisation et de leurs propriétés. Il s'agit ensuite d'adapter l'architecture moléculaire à l'effet spécifique que l'on désire obtenir. Les cristaux liquides ferroélectriques, par exemple, ont été décrits en France dans les années 70. Imaginées puis synthétisées, ces molécules chirales, dotées d'un fort moment dipolaire transverse permanent, s'associent elles-mêmes en un ordre lamellaire chiral. Cette mésophase (appelée smectique) est utilisée depuis dans une technologie d'afficheurs à commutation rapide, compatibles avec la TV Haute Définition.

Si, dans le cas précédent, le résultat escompté est atteint, en modifiant localement une architecture moléculaire classique, de nouvelles mésophases sont obtenues en réalisant des objets moléculaires de formes originales variées (phases colonnaires avec des disques moléculaires, tubulaires avec des macrocycles, ...).

L'ordre mésomorphe peut être également observé dans certains polymères fondus renfermant des motifs moléculaires connus pour s'assembler en mésophases (polymères mésomorphes en ligne, en peigne, oligomères mésomorphes cycliques) et dans des gels (chaînes réticulées) où il est possible d'observer un remarquable effet d'induction mésomorphe par contraintes mécaniques.

Enfin il existe des matériaux composites incorporant des cristaux liquides qui conduisent à d'intéressantes applications : par exemple, une nouvelle technologie d'afficheurs utilise une dispersion de gouttelettes de cristaux liquides dans un polymère isotrope (on peut, à cet égard, regretter qu'à l'heure actuelle une seule équipe travaille sur ce thème en France).

- *Nouvelles mésophases*

La compréhension de la structure de certaines mésophases pose de redoutables problèmes théoriques. L'exemple le plus spectaculaire est celui des phases bleues, observées sur des systèmes moléculaires optiquement actifs. Ces phases existent dans un intervalle de température si étroit qu'on a longtemps douté de leur existence. Des observations au

microscope optique et, plus récemment, au microscope électronique ont montré que la structure de ces phases consiste en une distribution périodique ou aléatoire de défauts particuliers (disinclinations). Pour justifier l'existence de ces phases, on a fait appel au concept de frustration géométrique chirale, c'est-à-dire à l'impossibilité de construire dans l'espace euclidien une structure satisfaisant, en chaque point, les tendances locales à la torsion.

S'il existe un ordre lamellaire qui se superpose à l'ordre d'orientation (caractéristique des structures nématiques), la réalisation d'un compromis permettant de lever partiellement une telle frustration est encore plus compliquée. L'importance de défauts topologiques (dislocations et disinclinations) dans les transitions de phases devient cruciale dans les systèmes bidimensionnels. Les cristaux liquides ont fourni le premier exemple de la phase dite hexatique, imaginée par Kosterlitz et Thouless, pour passer, dans certains systèmes tridimensionnels, de la phase cristalline au liquide isotrope. Dans la phase hexatique, l'ordre de position, caractéristique de la phase cristalline, est perdu, mais l'ordre d'orientation entre molécules voisines persiste sur des tailles de l'ordre de 100 Å.

- *Cristaux liquides aux interfaces*

Les problèmes d'ancrage et de mouillage des surfaces par les cristaux liquides ont reçu une attention particulière et peuvent déboucher sur des dispositifs d'affichage originaux. L'étude des phénomènes de croissance dans les cristaux liquides colonnaires permet de mesurer l'anisotropie de l'énergie interfaciale. Citons le problème des défauts bien connus dans les phases lamellaires : leur élimination impossible est due à leur nature intrinsèque.

- *Cristaux liquides lyotropes*

Les cristaux liquides lyotropes, c'est-à-dire les mésophases observées sur des mélanges soluté-solvant, ont donné lieu à un certain nombre d'études structurales. On trouve de telles phases dans la matière vivante, ce qui explique l'intérêt qui leur est



porté. Les transformations topologiques liées aux transitions cubique-hexagonal et cubique-lamellaire sont maintenant mieux comprises, On peut également citer des travaux originaux relatifs à la structure hexagonale de solutions concentrées d'ADN, ainsi que des études sur la biaxialité de nématiques et de cholestériques lyotropes.

### ***Etats intermédiaires de la matière et organisation biologique***

La biologie est le domaine des systèmes complexes, munis de régulations élaborées. Des voies nouvelles se différencient essentiellement en biophysique supramoléculaire. Il existe un nouveau savoir en physique de la matière condensée, dont les potentialités sont considérables en recherche fondamentale et appliquée, notamment dans le domaine biomédical. Il se trouve que ce nouveau savoir est particulièrement bien développé dans notre pays.

La physique des colloïdes était autrefois un domaine un peu trouble, difficile à cerner. Aujourd'hui, des disciplines se sont différenciées, comme la physique des cristaux liquides et celle des polymères, qui se recoupent en partie, la physique des transitions sol-gel, etc. Les applications de ces recherches aux cellules et aux tissus sont à peine amorcées, sauf pour les membranes cellulaires, dont la nature cristalline liquide est aujourd'hui très étudiée, sous certains angles. Dans ce domaine aussi, de nouvelles perspectives sont à attendre. En fait, ce sont tous les tissus, des plus durs aux plus mous, qui sont concernés ; on y rencontre des géométries de type cristal liquide, et leur structure, engendrée dans des conditions fluides, se trouve stabilisée à certains stades du développement ou de leur renouvellement par la création de liaisons plus ou moins solides entre macromolécules.

Cette nouvelle physique de la matière condensée, appliquée aux matériaux organiques et à leur contrepartie biologique, paraît devoir évoluer rapidement selon deux axes. L'un technique, lié aux progrès de la microscopie déjà mentionnés, l'autre,

plus fondamental : l'étude des symétries. Si les questions de symétrie, qui tiennent une place importante en physique, ont été brillamment introduites par Pasteur en biologie, elles sont un peu oubliées de nos jours. Pourtant, certaines transitions de phase, qui brisent une ou plusieurs symétries, peuvent intervenir dans la différenciation cellulaire. De telles transitions comportent chacune un moment d'instabilité où une orientation peut être préférée à d'autres. Il suffit alors, pour arrêter le choix, d'une faible anisotropie comme un courant cytoplasmique, un champ électrique faible ou un gradient local de concentration. Il existe aussi des situations d'instabilité chimique où une très faible quantité d'une substance (hormone ou autre facteur contrôlé par la machinerie moléculaire) fait basculer une cellule selon une voie de différenciation plutôt qu'une autre.

On ne saurait trop souligner l'importance de l'étude des diagrammes de phases dans certains systèmes complexes. La géométrie change en fonction de la composition et des conditions physico-chimiques; les exemples ne manquent pas, notamment dans les systèmes lipides-eau, avec les phases lamellaires, cubiques, hexagonales et d'autres phases exotiques, souvent proches de la géométrie des organites cellulaires. De plus, un même point du diagramme peut correspondre à plusieurs structures possibles, l'une plus stable et les autres métastables. On sait, par exemple, que dans les cristaux liquides certaines phases ne sont accessibles que par surfusion. De même, certaines organisations biologiques complexes ne sont obtenues qu'au terme d'un parcours précis dans un diagramme. Les cellules vivantes sont bien ces processeurs dont le fonctionnement des gènes établit un programme de conditions physico-chimiques dans l'espace et dans le temps, qui permet les différenciations ou le maintien d'architectures complexes, intra- ou extra-cellulaires.

A l'échelle des tissus et de l'organisme, tout un ensemble de communications intercellulaires repose sur des phénomènes physico-chimiques précis, où les aspects collectifs sont les plus essentiels. Le fonctionnement neuronal, au niveau local ou glo-

bal, est désormais l'objet des recherches d'une très vaste collectivité qui dépasse largement la neurobiologie proprement dite, avec des contributions essentielles de la physique et des mathématiques.

La membrane axonale se comporte à certains égards comme un dispositif d'affichage optique à cristaux liquides lors du passage du potentiel d'action. Des projets de microprocesseurs sont déjà en route avec les cristaux liquides ferroélectriques et il n'est pas impossible que les membranes cellulaires des neurones en soient déjà des modèles naturels.

## Matériaux hétérogènes

Accéder à la structure d'un matériau hétérogène n'a souvent d'intérêt que si cela permet d'en déduire les propriétés de transport et/ou le comportement mécanique. L'analyse de cette structure et de sa complexité fait appel aux techniques expérimentales nouvelles décrites plus haut mais aussi à des méthodes qui reposent sur l'étude des réponses du matériau à différentes sollicitations. Les dernières permettent d'obtenir des informations fines sans altérer le milieu. Leur difficulté pratique réside dans la non-linéarité de l'opération d'inversion. Différentes approches sont adoptées pour relier la structure aux échelles micro et mésoscopiques au comportement à l'échelle de l'observation. Les techniques d'homogénéisation, périodique et maintenant aléatoire, nécessitent une description des propriétés physiques et chimiques - aux échelles cristalline ou macromoléculaire - pour comprendre le comportement des systèmes hétérogènes. Si le comportement "quasi-statique" de matériaux solides commence à être ainsi modélisé de façon opérationnelle, beaucoup reste à faire en ce qui concerne le comportement dynamique, les régimes de grandes déformations ou encore les écoulements de matériaux visco-élastiques. la structure conditionne en effet le comportement, mais ce dernier peut lui-même induire des modifications ou des évolutions structurales importantes. La difficulté de l'approche provient d'une part de la nature non-linéaire du comportement, et d'autre part de l'apparition de structures cohérentes ou organisées - dans

l'espace mais également dans le temps - et ce à une multitude d'échelles qui rendent le concept même de volume élémentaire représentatif (ou de réponse instantanée) peu opérationnel.

Quelques paradigmes existent qui illustrent le changement de perspective à effectuer. Différentes notions, rassemblées sous le vocable "phénomène critique auto-organisé", se sont dégagées de modèles itératifs très simples (avalanches, blocs collants/glissants) mais aussi de résultats expérimentaux parfois anciens reliant, par exemple, la fréquence des tremblements de terre à leur magnitude. La question se pose de savoir discerner ce qui, dans cette approche, est réellement novateur. Il y a des contradictions affirmées avec le chaos (à petit nombre de degrés de liberté) : importance des structures spatiales, perte de prédictibilité algébrique et non plus exponentielle (5). Or il existe une phénoménologie particulière aux lois de probabilité à chute algébrique : les extrêmes pilotent le champ moyen. Une confrontation plus précise semble nécessaire avec les techniques multi-fractales avec lesquelles existent des identités mais aussi des différences.

Dans maints problèmes de ce type, on assiste à l'émergence de nouveaux "objets" sur lesquels fonder une description du système, irréductible à la simple superposition des comportements locaux individuels. Citons quelques exemples concrets de tels problèmes.

### Suspensions

Dans les suspensions (ensembles de particules solides de petite taille immergées dans un fluide porteur), divers types d'interactions à longue portée entre les particules peuvent engendrer une rhéologie complexe. On ne sait en particulier pas calculer la vitesse de sédimentation à forte concentration. Lorsque les particules ont des tailles variables, des effets de ségrégation peuvent survenir,

(5) Une divergence algébrique n'introduit pas de temps caractéristique, ce

donner lieu à des hétérogénéités structurales à grande échelle. Des agrégats peuvent se former et se casser dans un écoulement; on peut alors passer d'un état solide à un état fluide sous cisaillement (thixotropie). Lorsqu'il existe un contraste de constante diélectrique ou de conductivité entre fluide suspendant et particules, l'application d'un champ électrique va permettre de créer des amas filiformes alignés selon le champ, et donc de modifier parfois très sensiblement la viscosité du milieu (fluides électro-rhéologiques). De tels milieux trouvent des applications dans des éléments de transmission. Les structures ainsi formées peuvent aussi être figées. On obtient alors des matériaux composites ayant des propriétés mécaniques, optiques ou électriques nouvelles (exemple des conducteurs transparents).

### ***Ecoulements diphasiques en milieu poreux***

En mécanique des sols, la description du comportement de massifs granulaires ou pulvérulents est bien maîtrisée tant que le milieu est "solide". Quelques avancées théoriques ont été ébauchées plus récemment concernant l'écoulement rapide de milieux granulaires peu denses. Ce sont les situations intermédiaires entre ces deux limites, lorsque le milieu granulaire commence à s'écouler, ou lorsque coexistent des régions en écoulement et d'autres statiques, qui posent les problèmes actuellement non résolus. Un autre domaine très ouvert est celui des milieux vibrés. De nombreux travaux, tant expérimentaux que numériques et théoriques, commencent à aborder ce champ. Peut-on tenter une description hydrodynamique de ces milieux ? Existe-t-il une équation d'état régissant les milieux vibrés ? Comment décrire les effets de ségrégation de milieux polydispersés ?

### ***Ordre dans les couches minces monocristallines***

L'épitaxie classique permet d'obtenir des super-réseaux parallèles au substrat. Mais il est aujourd'hui possible d'obtenir des super-réseaux perpendiculaires à un substrat, faiblement désorienté en envoyant simultanément deux espèces en jets moléculaires. C'est peut-être aussi cette croissance

auto-organisée qui est à l'origine de la génération d'ordre à grande distance dans les alliages f(GaIn)P/GaAs].

### ***Agrégats métalliques***

La présence d'un désordre superficiel dans un nanocristal métallique peut modifier les températures de fusion et de solidification. L'optique et la microscopie électronique permettent de cerner les conditions entraînant de tels comportements, d'origine géométrique (courbure locale), ou interfaciale (nature du contact avec le milieu extérieur).

Cette liste est loin d'être exhaustive, Il conviendrait également de mentionner la tribologie, et les lois de comportement d'interface (friction, adhésion), le mouillage statique et dynamique de milieux hétérogènes, l'accrochage et le piégeage de fronts ou de lignes (lignes de dislocations ancrées sur des défauts, ondes de densité de charge, lignes de vortex dans les supraconducteurs, ...).

## **4 - ORDRE ET COMPLEXITÉ SPATIO-TEMPORELLE**

### **Interaction onde-matière**

#### ***Optique linéaire, non linéaire***

L'interaction onde-matière constitue un ensemble complexe en interaction dynamique, objet, d'étude et d'applications en soi.

En optique classique, l'onde ne perturbe le milieu matériel que de façon infinitésimale. On peut alors raisonner dans l'espace de Fourier, ce qui revient à considérer des ondes monochromatiques et unidirectionnelles. Si le désordre du milieu augmente, on passe d'un régime propagatif à un régime diffusif puis localisé (voir ci-dessous), ce que l'on repère par les propriétés spectrales, les modes propres ou la dynamique spatio-temporelle.



Cependant ce point de vue ne convient plus si le champ lumineux n'est plus négligeable devant les champs atomiques, cas fréquent avec les sources lasers. On entre alors dans le domaine de l'optique non linéaire, ou la réponse du matériau n'est plus proportionnelle au champ électromagnétique. Dans le cas d'un phénomène stationnaire, on peut considérer la réponse non linéaire du matériau comme locale et instantanée. Il est alors possible de développer en série l'indice de réfraction du matériau en fonction du champ électromagnétique. Une telle description conserve un sens à l'analyse de Fourier, avec des couplages perturbatifs entre les différentes composantes ou les différents modes. L'optique non linéaire s'est de ce point de vue révélée un outil de choix pour l'étude de la multistabilité et du chaos. Des bifurcations menant au chaos ont été observées avec une finesse remarquable et l'accord entre théorie et expérience est très satisfaisant dans les cas les plus simples de non-linéarités électroniques et thermiques.

Mais dans le cas de phénomènes plus rapides que la nanoseconde, on ne doit plus ignorer le temps de réponse fini des non-linéarités : la matière acquiert une sorte de mémoire des perturbations qu'elle subit. La décomposition de Fourier perd alors son sens physique, de même que la séparation conceptuelle entre l'onde électromagnétique et le matériau. Le formalisme doit s'adapter car il n'existe aujourd'hui que des réponses spécifiques à des problèmes particuliers. Citons en exemple la diffusion Brillouin résultant de l'interaction entre une onde lumineuse et des ondes sonores excitées dans un milieu matériel<sup>(6)</sup>. Dans un régime stimulé tant du point de vue acoustique qu'optique, tout se passe comme si le milieu conservait une mémoire des interactions antérieures. Le système se comporte alors comme un laser acoustique dont un modèle d'interaction cohérente à trois ondes (onde

Optique incidente, diffusée et onde acoustique) décrit bien l'évolution dynamique.

C'est vers des formalismes analogues que s'oriente aujourd'hui l'étude des phénomènes sub-picosecondes. Ces comportements, maintenant accessibles à l'expérience, ne seront néanmoins maîtrisés qu'au terme d'une réflexion théorique sur les fondements de l'électro-magnétisme dans la matière. Un bouleversement du langage de l'analyse de Fourier au profit d'autres formalismes en est à la fois l'enjeu et le prix.

### **localisation**

En milieu désordonné, une onde classique est piégée par interférences à tous les ordres de diffusion. L'analyse de Fourier est inutilisable et le concept de localisation rend compte de la compétition entre propagation d'une part, dissipation, fuite des modes guidés et interactions non linéaires d'autre part. Notons l'aspect fractal que peuvent alors revêtir les fonctions d'onde, leur structure spatio-temporelle devenant invariante par changement d'échelle d'observation. La localisation faible 3-D, ainsi appelée car elle n'est qu'une correction cohérente au régime diffusif, est à l'origine des tavelures, véritable signature du milieu dont le décodage est un enjeu important en astronomie et pour des tests non destructifs. La localisation forte 3-D pose de difficiles problèmes abordés par l'optique, l'électromagnétisme et l'acoustique (milieux poreux) ainsi que par des études théoriques sur les systèmes périodiques et les résonances internes. La localisation 2-D est abordée en régime de désordre faible (cavités lasers planaires distribuées, induites par localisation). La recherche en localisation 1-D est très active : cordes à distribution de masse aléatoire, ondes acoustiques dans des tuyaux percés aléatoirement (pot d'échappement silencieux), troisième son dans les films d'hélium, ondes de Rayleigh à la surface d'un solide à rugosité aléatoire. La localisation offre encore d'intéressantes perspectives avec les matériaux non-linéaires (solitons, effet Raman de surface amplifié). Enfin, les structures fractales donnent lieu à des effets spécifiques (localisation de phonons, ou fractons).

<sup>(6)</sup> En régime spontané, la lumière est faiblement diffusée sur une largeur spectrale d'autant plus étroite que les ondes sonores s'amortissent lentement. En régime stimulé, une résonance se produit et détermine une fréquence de rétrodiffusion très précise, phénomène bien connu des plasmiciens qui cherchent au contraire à s'affranchir de cet effet pour permettre au rayonnement de pénétrer un plasma confiné.

## Progrès récents en turbulence des fluides

Des avancées fondamentales ont été réalisées ces dernières années dans le domaine de la turbulence, non seulement grâce aux progrès spectaculaires des moyens informatiques mais aussi grâce à des expériences très originales réalisées en laboratoire, au développement d'outils d'analyse nouveaux comme la transformée en ondelettes, et enfin à des approches théoriques inspirées de la mécanique statistique. Les points nouveaux et sur lesquels un certain consensus existe sont la mise en évidence expérimentalement et numériquement de structures cohérentes dont la présence au sein d'un fluide turbulent remet en question les approches traditionnelles de la turbulence, et l'existence de structures non nécessairement dissipatives aux très petites échelles.

### Structures cohérentes

L'importance des structures cohérentes s'est imposée dans tous les écoulements turbulents, même ceux à *a priori* les plus désordonnés. L'exemple naturel le plus frappant en est la Tache Rouge de Jupiter.

Ces structures apparaissent comme une organisation locale de l'écoulement où la vorticité (rotationnel de la vitesse) devient très grande. Elles semblent jouer un rôle dynamique important par leurs interactions mutuelles (appariements, liaisons...) ou leurs déformations. On pense en particulier que le phénomène d'intermittence, mis en évidence statistiquement par un comportement non-gaussien (7) des densités de probabilité des gradients de vitesse par exemple, provient de la présence des structures cohérentes. Toutefois, on ne dispose pas   ce jour de modèle dynamique de l'intermittence reliant celle-ci   la dynamique des structures cohérentes. Les modèles stochastiques actuels, construits à partir de

moyennes (moyennes d'ensemble, moyennes spatiales et temporelles), gomme toute information sur l'existence de structures cohérentes localisées, dans la mesure où celles-ci se déplacent au cours de l'évolution de l'écoulement. Il apparaît urgent, si Ton veut prendre en compte les structures cohérentes dans la théorie de la turbulence, de définir de nouveaux types de moyenne mieux adaptés.

La théorie classique de la turbulence et les simulations numériques reposent sur une séparation entre grandes échelles (au sens modes de Fourier de petit nombre d'onde) où s'effectuent les transferts de façon inviscide et petites échelles (modes de Fourier de grand nombre d'onde) dissipatives. On s'oriente aujourd'hui, dans une nouvelle direction en définissant cette fois-ci une séparation entre régions dynamiquement actives (en général multi-échelles) pour lesquelles il est nécessaire de préserver à la fois l'information spectrale et spatiale, et régions dynamiquement passives dont on peut se contenter de décrire le comportement en moyenne.

Des efforts sont actuellement développés pour décrire les structures cohérentes et leurs interactions, en particulier les comportements différents des tourbillons cycloniques et anticycloniques dans un fluide turbulent en rotation, ainsi que les dynamiques différentes des structures cohérentes d'une part et de l'écoulement résiduel d'autre part. Certains sont fondés sur l'analyse en ondelettes, qui préserve à la fois l'information spatiale et spectrale. D'autres conduisent à une description statistique proche de celle proposée initialement par Onsager en 1949. Des tâches de vorticité, initialement uniforme, sont transportées par la turbulence et déformées jusqu'à atteindre un état qui maximise une entropie de mélange en tenant compte des contraintes fournies par les constantes du mouvement. Cette théorie permet de décrire les appariements successifs de tourbillons et leur rassemblement éventuel en un tourbillon isolé.

### Structure aux petites échelles

Des simulations numériques à très haute résolution de turbulence incompressible tridimensionnelle ainsi que la visualisation directe de flots en la-

(7) Ces distributions non-gaussiennes conduisent à des corrections au spectre de Kolmogorov, les plus récentes étant issues d'une approche multifractale de la turbulence.

laboratoire confirment que les zones de vorticité maximale sont organisées en longs filaments dont l'épaisseur est proche de l'échelle de dissipation. Ces filaments sont instables et disparaissent en donnant naissance à de grandes structures. Une très bonne corrélation a été trouvée entre tourbillons intenses et dépressions et la vorticité apparaît plus concentrée spatialement que les zones de forte dissipation d'énergie. L'introduction d'une très faible quantité de polymères dans un fluide turbulent inhibe totalement la formation, des longs filaments de forte vorticité. Cependant on observe que les polymères sont progressivement dégradées (les chaînes sont cassées en morceaux de plus en plus courts) sous l'effet du cisaillement très localisé qui, lui, existe toujours. Cette expérience confirme de façon spectaculaire que toutes les petites échelles ne sont pas nécessairement des structures dissipatives.

### ***Effets de la compressibilité, de la rotation***

Les enjeux spatiaux et industriels considérables dans le domaine des écoulements compressibles et hypersoniques ont été à l'origine d'une moisson de résultats sur l'influence de la compressibilité. On commence à simuler en détail l'interaction entre chocs et tourbillons, le couplage entre des réactions chimiques simples et des écoulements turbulents, avec applications à la combustion et   la physico-chimie de l'atmosphère dans des écoulements supersoniques par exemple. Etudier l'influence d'une rotation d'entraînement sur la turbulence est essentiel dans le domaine des machines tournantes (pompes, moteurs d'avion), et des écoulements géophysiques (internes et externes) et astrophysiques. De nombreuses expériences numériques ou de laboratoire confirment les effets bidimensionnalisants de forts taux de rotation sur la turbulence.

## **Physique des plasmas chauds**

L'objet de la physique des plasmas chauds est l'étude des milieux dilués, dominés par les effets collectifs associés aux interactions électromagnétiques des électrons libres et des ions. En laboratoi-

re comme en astrophysique, ces milieux sont le plus souvent loin de l'équilibre thermodynamique, ce qui favorise la génération d'une turbulence où ordre et complexité se manifestent à toutes les échelles. La compréhension de ces phénomènes met en jeu l'ensemble des théories modernes de la turbulence hydrodynamique, des systèmes dynamiques nonlinéaires..., auxquelles les physiciens des plasmas ont largement contribué.

Ainsi la propagation nonlinéaire des ondes électromagnétiques intenses (ionosphères, interaction laser-matière) met en jeu simultanément la dynamique électronique, ionique et photonique. Ces phénomènes sont alors décrits par des systèmes d'équations nonlinéaires couplées. Ainsi en est-il par exemple de la diffusion Raman stimulée, la diffusion Brillouin stimulée, l'autofocalisation, la filamentation. Si les solutions à 1 et 2 dimensions sont en général connues, en revanche les problèmes tri-dimensionnels nécessitent des simulations numériques lourdes. De plus, en raison des différentes échelles de temps les simulations nécessitent la mise au point de modèles théoriques et d'analyse numérique fine.

Les structures cohérentes magnétohydrodynamiques ( lots magnétiques...) ont été observées dans les plasmas confinés par un champ magnétique dès les premières expériences Tokamak. Des avancées fondamentales ont été réalisées ces dernières années dans le domaine du transport collisionnel en présence d'îlots magnétiques imbriqués dans les zones de champ stochastique qu'ils génèrent. Des efforts se poursuivent afin de relier les paramètres macroscopiques aux caractéristiques de cette turbulence magnétique.

Enfin révolution nonlinéaire des instabilités électrostatiques dans un plasma conduit à l'apparition de champ turbulents dans lesquels la diffusion des particules s'écarte parfois des lois quasi-linéaires. On a montré que ces champs autoconsistants (créés par le mouvement des particules) ont un caractère nongaussien, dès que les couplages de modes entrent en jeu. Cet effet traduit l'existence de structures cohérentes dans l'espace des phases et



nécessite la mise au point d'une théorie différente du développement quasi-linéaire.

## Astrophysique

Le monde de l'astrophysique est par essence l'un des plus complexes, de par la diversité des milieux en présence et des phénomènes physiques mis en jeu, et des plus ordonnés, de par l'existence de remarquables lois d'échelles observées maintenant sur quatre décades en taille au sein de la matière lumineuse (8) (étoiles, galaxies, amas, superamas, ...) mais aussi dans les structures gazeuses infiniment plus diluées qui constituent le milieu interstellaire.

Si l'on sait, depuis longtemps que c'est la force gravitationnelle qui est à l'origine de la formation des étoiles et du mouvement orbital des planètes, ce n'est que depuis peu que l'on sait former, dans certains modèles d'Univers, de grandes structures semblables à celles observées. Elles résultent de la croissance d'instabilités gravitationnelles initiées par les fluctuations de densité dans la matière sombre de l'Univers primordial. Malgré de remarquables résultats observationnels obtenus récemment, la physique de l'Univers primordial est encore très spéculative (fluctuations quantiques, inflation, défauts topologiques), La croissance de ces fluctuations est en revanche mieux comprise grâce à l'apport d'outils issus de la physique des particules, de la mécanique statistique et des simulations numériques. Il n'en reste pas moins qu'on ne sait pas relier les propriétés de la matière pesante à celles de la matière lumineuse.

Les galaxies sont comparativement plus simples mais la dynamique des  $10^{11}$  étoiles qui typiquement les composent est extrêmement difficile à décrire. La phase linéaire de l'évolution (création des structures spirales et des spirales barrées par exemple) est assez bien comprise, mais l'étude non-linéaire (évolution à plus long terme, permanence) reste en gran-

de partie à faire. Seule une interaction forte entre analyses théoriques et simulations numériques est à même de faire progresser ce domaine.

Le milieu interstellaire, et peut-être intergalactique, est quant à lui un extraordinaire laboratoire étant données les conditions extrêmes qui y régnent. Gaz un million de fois plus dilué que les meilleurs vides réalisés sur Terre, il existe sous plusieurs phases, à des températures allant de dix degrés Kelvin à plusieurs millions de degrés. Les mouvements violents qui y sont observés sont turbulents et supersoniques à toutes les échelles et les nombres de Reynolds dépassent de plusieurs ordres de grandeur ceux réalisés en soufflerie : on a ainsi accès au plus grand domaine inertiel jamais étudié. Partiellement ionisé, il est donc fortement couplé au champ magnétique. Malgré sa faible densité et la forte irradiation en rayonnement ultra-violet qu'il reçoit des étoiles, des molécules complexes s'y forment ainsi que des particules solides (agrégats) dont le spectre de taille s'étend de quelques Å au micron. Ces composants mineurs de par leur masse jouent cependant un rôle fondamental dans la thermodynamique du gaz.

C'est au sein de ce milieu que se forment les étoiles, au terme d'un processus encore incompris. Si la croissance de l'instabilité gravitationnelle est bien un phénomène local, les conditions initiales de son développement ne le sont pas. On découvre en effet actuellement la structure hiérarchique du milieu interstellaire, son invariance d'échelle et le couplage dynamique entre ces échelles, autant de facteurs qui rendent le processus de formation d'étoiles hautement non local. L'invariance d'échelle peut avoir son origine dans la nature turbulente des écoulements interstellaires qui présentent des propriétés d'intermittence analogues à celles observées par exemple dans l'atmosphère terrestre. L'intermittence joue probablement dans la dynamique et la physico-chimie de ce gaz un rôle qui reste à découvrir.

Enfin, l'une des propriétés remarquables de ce milieu, et l'un de ses paradoxes, en est la fragilité étant donnée la violence des perturbations auxquelles il est soumis, fragilité qui contraste avec sa robustes-

(8) par opposition à la matière dite sombre, non observée directement, par sa radiation électromagnétique, dont la nature n'est encore pas déterminée et qui constitue cependant environ 90 % de la matière pesante dans l'Univers.

se : partout où il est observé, non seulement dans Galaxie mais aussi dans des galaxies éloignées très différentes de la nôtre, ce milieu présente les mêmes caractéristiques essentielles (lois d'échelles, distribution de niasse, constitution chimique ...).

## Hydrologie

Les méthodes, les concepts et les résultats de l'hydrologie scientifique présentent bien des insuffisances et des lacunes. De nombreux "modèles" ne sont que de simples régressions et les relations empiriques ad hoc sont légions. C'est ainsi que l'on ne sait pas vraiment comment l'eau se comporte dans un bassin versant, ni comment les précipitations se répartissent en ruissellement, infiltration et évapotranspiration. La compréhension, puis la quantification, du fonctionnement d'un bassin versant est pourtant un objectif incontournable de l'hydrologie. Les problèmes de changement d'échelles ne sont pas non plus maîtrisés et un modèle laborieusement "calé" sur un bassin versant de 1 km<sup>2</sup> n'est absolument pas transposable à un bassin de 100 km- du même ensemble géographique.

Parmi les efforts déployés à l'heure actuelle pour surmonter ces difficultés et débloquent une situation figée, il faut noter les débuts d'applications des méthodes fractales et multifractales. Elles ont été appliquées à la description et à la caractérisation géométriques des réseaux hydrographiques, des bassins versants et des milieux souterrains poreux et/ou fracturés ainsi, surtout, qu'à une nouvelle approche de l'étude des précipitations.

Dans ce dernier domaine l'analyse des données obtenues par les radars météorologiques et les pluviographes digitaux a permis de reconnaître l'extrême intermittence des précipitations dans le temps et dans l'espace. L'examen des durées pendant lesquelles différents seuils d'intensité ont été atteints ou dépassés permet de se rendre compte que la moitié des précipitations annuelles tombe en quelques heures et on a pu remarquer l'émiettement et la complexité des contours des zones précipitantes.

Les fractals ont d'abord été considérés d'un point de vue purement géométrique. Sous cet angle, la pluie est considérée comme un ensemble auquel un point (de l'axe du temps) appartient ou n'appartient pas. Des structures autosimilaires pour des échelles de temps allant de quelques jours à quelques mois ont été mises en évidence pour de nombreuses stations. Cette présentation ne doit cependant pas faire oublier qu'il y a nécessairement dans toute définition de l'occurrence de pluie une notion de seuil qui renvoie à celle d'intensité. La dimension fractale obtenue dépend du seuil choisi : elle décroît lorsque le seuil augmente. Cette dépendance de la dimension d'un ensemble à la valeur de son seuil de référence a amené de nombreux auteurs à introduire la notion de champ multifractal. Le phénomène étudié est alors représenté par une hiérarchie de fractals correspondant aux régions, de plus en plus ténues, sur lesquelles le champ dépasse des seuils de plus en plus élevés. De telles études sont actuellement menées théoriquement et à partir de données empiriques et laissent déjà entrevoir d'intéressants résultats (invariants d'échelle) dans le domaine des précipitations extrêmes et dans celui des courbes fréquence-intensité-durée.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Aucun consensus n'a émergé sur les points à inclure dans cette section, et il paraît même honnête de mentionner que chacun de ceux abordés lors des réunions du groupe a soulevé de très vives controverses, qu'il s'agisse de l'évaluation des chercheurs et des laboratoires, de la formation des chercheurs ou de l'harmonisation des politiques de soutien à la recherche.

On peut néanmoins mentionner quelques idées sur lesquelles une certaine unanimité s'est dessinée, bien qu'aucune d'entre elles ne soit spé-

cifique au thème "Ordre et complexité dans la matière".

#### • *L'interdisciplinarité*

L'expérience de chacun de nous tend à prouver que les échanges entre disciplines ne fonctionnent que s'ils sont pilotés par les chercheurs eux-mêmes, et de leur propre initiative. Ce que Jacqueline de Romilly exprimait récemment avec ces lignes : *"Le hasard suscite ces rencontres. La liberté les fait rechercher. Il n'y faut que deux conditions : l'institution doit fournir en abondance les occasions d'information réciproque; et l'esprit de chacun doit y être préparé"*.

Les échanges interdisciplinaires requièrent en effet une grande maturité scientifique de la part des chercheurs. Sans cette maturité, la porte est ouverte à très court terme à la superficialité et la dégradation de la démarche scientifique. Il apparaît pour cette raison dangereux d'introduire l'interdisciplinarité dans l'enseignement, ce qui ne veut pas dire que les approches nouvelles mentionnées dans ce rapport ne doivent pas être incorporées progressivement au niveau des DEA par exemple. L'organisation de séminaires de recherche, à la fois didactiques et ouverts sur des développements récents, dans le cadre des écoles doctorales, est un bon compromis qui se développe aujourd'hui

#### • *les structures et les moyens*

L'histoire récente des succès de la recherche nous enseigne que les avancées significatives ne se font pas toutes suivant les mêmes schémas, ni au même rythme, ni avec les mêmes moyens. Si la compétitivité de la France et de l'Europe dans nombre de domaines (l'astrophysique, la géophysique, l'espace et la physique des particules, pour ne citer que ces exemples) est due essentiellement au regroupement des moyens (financiers et humains) autour de grands projets dont la conception, la réalisation et l'exploitation se sont étalées sur plusieurs décennies, nombre de percées remarquables sont le fait de petites équipes, travaillant avec des

moyens beaucoup plus modestes et sur des échelles de temps beaucoup plus courtes. Il est donc vital de sauvegarder cette dualité, aussi complexe soit-elle à mettre en œuvre, en encourageant d'une part les regroupements au niveau international pour le financement des moyens lourds, tout en soutenant sur des laps de temps de l'ordre de quelques années les équipes et les laboratoires engagés dans des recherches de pointe. .

## REMARQUE FINALE

Il n'est pas apparu, au terme du travail du groupe 07, de concept fédérateur parmi les disciplines représentées, ce qui donne au rapport sa structure pointilliste, regrettable certes, mais également révélatrice de la richesse du thème et de la diversité des approches en présence. La rédaction reflète sans doute aussi les oppositions réelles (et salutaires) entre différentes "écoles" de physiciens, celles proches des mathématiques, celles plus proches du monde expérimental et des observations et celles axées sur la simulation numérique. Nous tenons à mentionner la difficulté rencontrée à aller bien au-delà de l'environnement scientifique immédiat des membres du groupe, ce qui limite la portée du rapport et conduit à l'hypertrophie de certains thèmes. Il reste à souligner le caractère subjectif nécessairement attaché au type de travail que représente ce rapport, s'agissant d'un discours sur un domaine en mouvance dont les contours échappent encore à une terminologie précise commune aux disciplines représentées dans le groupe.

**Edith Falgarone**

*Présidente du groupe 06*

*avec la collaboration de*

*Jean Bellissard*

*Alain Chenciner*



# 07

## ECHELLE MESOSCOPIQUE DE LA MATIERE

### LES ENJEUX

#### 1 - ENJEUX SCIENTIFIQUES

le terme mésoscopique englobe, nous le verrons, des thèmes très variés de la physique et de la chimie, En donner une approche globale reste un exercice extrêmement difficile. Néanmoins une interpénétration existe, tant au niveau des concepts et des outils mathématiques, qu'au niveau des moyens de caractérisation voire de fabrication. D'une manière générale, l'enjeu scientifique majeur est la compréhension du comportement de la matière à une échelle critique intermédiaire - d'où le terme mésoscopique - entre l'atome ou la molécule et le solide massif. Cet enjeu est ou bien dicté par le désir de connaissance à cette échelle pour des raisons diverses - agrégats, nanostructures, polymères, composites - ou bien alors, est une étape essentielle dans la compréhension de phénomènes macroscopiques tels que la croissance cristalline, l'adhérence, la catalyse ou bien encore l'usure.

Que devient la notion de résistance dans des échantillons que les électrons peuvent parcourir sans perdre d'énergie ? Quel est le spectre d'excitation d'un agrégat d'atome par rapport au spectre atomique de ses constituants ou du solide macroscopique ?

Quelles propriétés particulières peut-on attendre d'un matériau nanocristallin pour lequel la fraction d'atome en surface est très importante ? Comment prévoir les propriétés mécaniques de matériaux hétérogènes (rupture, plasticité, rôle de la corrosion) ? Voici quelques exemples de questions auxquelles tentent de répondre physiciens et chimistes lorsqu'ils étudient les systèmes de taille réduite. La taille critique qui intervient n'est pas univoque, elle dépend du système et de la propriété étudiée :

- nombre d'atomes dans un agrégat métallique pour obtenir la délocalisation électronique -  $N = 3$  pour les alcalins;

- nombre d'atomes d'un agrégat interstellaire dont on étudie les fluctuations de température à l'origine de sa fluorescence infrarouge -  $N_c = 20$  à  $20\,000$ ;

- longueur de cohérence de phase de la fonction d'onde électronique pour l'étude des propriétés de transport des nanostructures -  $L_\phi$  : quelques  $\mu\text{m}$  à basse température;

- longueur d'onde de l'électron de conduction pour les effets de quantification de l'énergie - cas des propriétés optiques des fils quantiques -  $L =$  quelques nm;

- taille du réseau ou du grain de l'ordre de la longueur de cohérence des paires de Cooper pour

l'étude des propriétés supraconductrices - quelques nm à quelques

- taille du domaine magnétique ou longueur d'échange pour l'étude des propriétés magnétiques (quelques microns pour les domaines, quelques dizaines de nm pour les longueurs d'échange);

- diamètre d'une sphère de latex dans une suspension, colloïdale - quelques nm

- diamètre d'une fibre dans un composite -

- taille d'une vésicule utilisée par exemple pour contenir et véhiculer des produits spécifiques (médicaments, lubrifiants) - 10nm à quelques  $\mu\text{m}$ .

Certains de ces objets, qu'ils soient des artefacts ou qu'ils existent dans la nature, sont des objets modèles. Par exemple, pour la plupart des agrégats, la croissance se fait suivant des règles géométriques d'empilement des atomes. Pour les agrégats métalliques simples, au contraire, la stabilité est déterminée par les électrons de conduction qui s'arrangent en états quantiques ordonnés comme les électrons de l'atome ou les protons et les neutrons des noyaux. Bien que les forces de cohésion, ici de nature électromagnétique, soient bien inférieures aux forces nucléaires responsables de la stabilité des noyaux, l'analogie agrégats métalliques/noyaux est bien fondée et les concepts théoriques développés en physique nucléaire s'avèrent très fructueux pour la compréhension de la croissance des agrégats. Ces objets permettent également l'étude de manifestations de la mécanique quantique à l'échelle mésoscopique. Ce sont, par exemple, les effets d'interférences d'électrons dans les nanostructures qui donnent lieu à des phénomènes surprenants comme les fluctuations universelles de conductance et les effets de localisation ou les manifestations macroscopiques de l'effet tunnel, cas du renversement de l'aimantation d'une particule magnétique. Le confinement spatial lève la dégénérescence des niveaux d'énergie ce qui se traduit par une modification des propriétés optiques des nanocristaux semiconducteurs. L'interaction agrégat

matière introduit une nouvelle échelle dans l'étude des collisions : entre le microscopique des collisions atome-atome et le macroscopique des impacts dans les solides (formation de cratères, onde de choc). Il s'agit en particulier de décrire l'équation d'état de l'état éphémère de la matière sous l'impact d'agrégats,

Dans la pénétration de particules chargées dans un monocristal l'échelle mésoscopique est atteinte lorsque le projectile ressent le potentiel cristallin transverse des plans ou des rangées d'atomes. La particule canalisée se trouve alors piégée dans un puits quantique à deux dimensions (canalisation axiale) ou à une dimension (canalisation planaire). Avec des faisceaux d'ions cela permet en particulier d'étudier l'interaction d'un ion très chargé avec un gaz dense d'électron quasi-libres. Avec des faisceaux d'électrons relativistes cela conduit au "rayonnement de canalisation" de photons monochromatiques de quelques keV à quelques MeV, dont les applications sont très prometteuses (lithographie, applications médicales).

Un autre exemple est celui des cristaux colloïdaux qui présentent toutes les subtilités de la physique cristalline mais à des échelles de l'ordre du millier d'Angström voire du micron. Ce sont, par exemple, les cristaux de latex ou les gouttelettes d'huile monodispersées en taille en suspension dans l'eau. C'est également le cas des "phases bleues" formées de molécules dont les orientations se structurent à trois dimensions tout en restant localement fluides, ainsi que les phases cubiques dans les mélanges eau huile tensio-actifs et les phases "double diamant" des copolymères.

Plus généralement, la physique dite de la "matière molle" a pour champ d'étude les systèmes où il existe une structuration à l'échelle mésoscopique. Comment ces systèmes s'organisent-ils à partir de constituants microscopiques souvent fort complexes (grosses molécules) et aux interactions multiples, pour donner des systèmes macroscopiques aux propriétés physiques et mécaniques originales ? Peut-on dégager des lois générales pour ces systèmes mais aussi proposer des matériaux nouveaux

aux propriétés intéressantes ? L'étude de ces méso-structures est souvent facilitée par le fait que les structures peuvent être suffisamment grandes pour que leur constitution soit décrite de façon statistique (indépendamment des détails de structure chimique et d'interactions) et en même temps suffisamment petite pour que leurs déformations et leurs fluctuations à plus grande échelle puissent faire l'objet d'un traitement géométrique et statistique. De nombreux systèmes aux propriétés originales sont étudiés :- les polymères, dont la synthèse chimique permet de créer une variété presque infinie de structures;

- les lyotropes (savons, phospholipides, copolymères) systèmes de nature bidimensionnelle (films de Langmuir-Blodgett, vésicules, liposomes);

- les matériaux mésomorphes (cristaux liquides, liquides ferroélectriques, ...);

- les systèmes composites fluides ou solides (boues, ferrofluides, latex..).

L'ensemble de cette approche se retrouve dans la démarche de la mécanique des matériaux hétérogènes. L'échelle mésoscopique en mécanique est celle qui définit le volume représentatif pour lequel la loi de comportement homogénéisée peut être appliquée, elle se situe entre l'échelle microscopique des mécanismes élémentaires (hétérogénéités constitutives ou induites par la déformation) et l'échelle macroscopique de la pièce dont on calcule la réponse à une sollicitation par la mécanique des milieux continus. C'est aussi l'échelle du "point matériel" de la mécanique. De part et d'autre d'une interface, les deux constituants souhaitent généralement se déformer différemment sous l'effet de la sollicitation appliquée. L'interface constitue donc une zone d'incompatibilité mécanique origine de contraintes souvent élevées. L'influence du comportement de l'interface sur les propriétés macroscopiques du matériau reste encore très obscure et ne permet pas une optimisation de leur utilisation notamment pour

les matériaux, composites (céramiques, fibres de carbone, matériaux composites pour le bâtiment..-).

Le caractère mésoscopique intervient également de façon plus intrinsèque, c'est le cas des surfaces et interfaces. Une surface est la frontière entre une phase dense et une atmosphère gazeuse, voire le vide, et une interface la frontière entre deux milieux condensés. L'extension spatiale des zones de surface ou d'interface, c'est à dire celle des régions des phases condensées où les propriétés diffèrent de celles du volume, est d'ordre mésoscopique : elle se mesure en nombre limité de couches atomiques. La structure même du tout premier plan atomique d'une surface fait aussi apparaître des entités de taille mésoscopique : mailles de surstructure, domaines, îlots, portions de terrasses correspondant à des plans cristallographiques denses entre deux marches, distances entre crans le long d'une marche... Les recherches portent aussi bien sur les états d'équilibre que sur la dynamique d'évolution des surfaces et des interfaces. On peut noter la description des transitions de phase d'ordre infini, permettant d'approcher des phénomènes tels que la transition rugueuse, la stabilité des bords de marches, la fusion bidimensionnelle. En ce qui concerne les systèmes en évolution dynamique on peut souligner l'étude des fronts de solidification et des avancées de marches lors de la croissance cristalline,

L'électrochimie interfaciale qui traite des réactions impliquant un transfert de charge à une interface entre un conducteur ionique et un conducteur électronique a donc toute sa place dans ce thème. Le développement de méthodes de caractérisation *in situ* de ces dernières années a conduit à une description fine de la surface des électrodes, des phénomènes d'adsorption, de reconstruction et de construction de phases nouvelles aux interfaces. Cette description se complique énormément lorsque l'interface n'est plus à l'équilibre mais est le siège de réactions. Il en résulte des processus rapides d'adsorption, de diffusion superficielle, de formation d'intermédiaires de réactions qui accompagnent les phénomènes de dissolution, de



croissance, de passivation et d'électrocatalyse. S'il est possible de résoudre temporellement des phénomènes rapides, il devient très difficile de les localiser à une échelle suffisamment fine. La réactivité d'une surface est fréquemment influencée par le couplage contrainte mécanique/environnement dont les conséquences sur le plan macroscopique sont très importantes (rupture de pièce).

Il en est de même pour la catalyse, qui s'intéresse au processus de physisorption (adsorption multicouche de molécules à activer), de chimisorption (coupure de liaisons de la molécule par la surface et création de liaisons à partir de fragments organométalliques liés à la surface); la complexité des phénomènes chimiques à l'interface joue un grand rôle. L'acte catalytique étant imparfait dans ces performances (activité, durée de vie, sélectivité, régénéralité, ...), il est nécessaire d'avoir une compréhension poussée de ce matériau catalytique lors de son élaboration, en cours de fonctionnement et après sa régénéralité,

Les frottements, et d'une manière plus générale la tribologie qui traite de l'interaction des solides en mouvements relatifs et regroupe l'adhérence, l'usure et la lubrification, font intervenir également des surfaces et interfaces et donc une échelle mésoscopique. Si Ton considère le contact entre deux solides sans interposition délibérée d'une couche intermédiaire, il est aujourd'hui bien reconnu que les interactions à l'échelle moléculaire sont déterminantes. Ainsi l'usure se caractérise par une perte de matière qui n'est pas enlevée atome par atome, mais arrachée par rupture cohésive, si les forces d'adhésion sont importantes, ou par rupture fragile sous l'effet du frottement. On ignore encore le détail de la formation des particules d'usure, de la nature des réactions chimiques (cas du frottement métal polymère) de la rhéologie des agglomérats de particules d'usure. Dans le cas de frottements lubrifiés, le problème est de même nature. En effet, il s'agit de couches très minces sollicitées dans des conditions de très haute pression et de grande vitesse de déformation.

## 2 - ENJEUX TECHNOLOGIQUES

### Microélectronique

L'amélioration du couple coût-performance des circuits électroniques nécessite l'augmentation de l'intégration des composants. La plus petite taille dans un circuit intégré commercial actuel est de  $0.7 \mu\text{m}$ , il est prévu de la réduire, en lithographie optique, à  $0.25 \mu\text{m}$  vers 1995-1998, En-dessous de  $0,1 \mu\text{m}$ , obtenu par d'autres méthodes telles que lithographie électronique ou X, les phénomènes qui limitent déjà les circuits actuels (effet d'électrons chauds dans les barrières, chauffage des interconnexions) auront des effets encore plus dramatiques. Les technologues se tournent donc vers de nouveaux concepts de composants qui pourraient utiliser des effets quantiques : c'est le domaine de la nanoélectronique. Ce domaine allie l'ingénierie de la croissance des semiconducteurs et donc la maîtrise de la dynamique des surfaces (épitaxie par jet moléculaire, organo-métallique) et les techniques de nanofabrication. Quelques structures prometteuses sont en cours d'étude :

- les structures résonantes à double barrières tunnel,
- les structures à blocage de Coulomb : transistor à un seul électron, éclipse à électron,
- les structures de type interféromètre,
- les structures utilisant les nouveaux supraconducteurs pour les dispositifs ou les connexions.

Le savoir-faire technologique de la fabrication de ces nouveaux objets est un enjeu majeur et nécessite un effort important dans la technologie ultime de fabrication. Cela concerne aussi bien la régularité d'un fil nanométrique obtenu par lithographie que la fabrication de nanoparticules monodispersées dont la surface puisse être contrôlée.

Une autre voie en plein développement est celle de l'électronique moléculaire où il s'agit d'élaborer des molécules qui reproduisent à l'échelle de la molécule les fonctions des composants électroniques. Le pari de l'électronique moléculaire est que le remplacement d'une unité monoatomique simple telle que le Silicium par des molécules complexes devrait déboucher sur des performances accrues et surtout des fonctions nouvelles. L'ionique moléculaire en est une variante inspirée des systèmes biologiques, dans laquelle les molécules opèrent non plus sur les électrons mais sur les ions.

## Nouveaux matériaux

La présence importante des joints de grain dans les nanocristaux permet d'obtenir des matériaux qui peuvent allier la dureté du nanocristal à la ductilité due au glissement des joints de grain. D'autre part, lorsque la taille de grain de certains matériaux ferromagnétiques devient inférieure à la longueur d'échange, l'anisotropie magnétocristalline est supprimée et on obtient des perméabilités très importantes. Une autre application des matériaux nanocristallins concerne les composites où une nanodispersion de phases dures et ductiles permet la suppression de la propagation des fissures et augmente la ténacité. On sait aussi inclure dans une matrice de verre de très petits cristaux semiconducteurs : CdS, CdSe, CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub>, CuCl, PbS. Ces verres, commercialisés comme fibres optiques, pourraient être utilisés comme absorbant saturable, comme milieu laser ou dans des dispositifs à base de guide d'onde. Une grande accordabilité en longueur d'onde peut être obtenue par le choix soit du semiconducteur, soit de la taille des nanocristaux. Citons également les fullerènes dont on sait maintenant fabriquer des quantités macroscopiques. Leurs structures diffèrent de celle du diamant et du graphite et laissent espérer des propriétés physiques très intéressantes (microbilles, lubrifiants supraconducteurs, ...).

L'ingénierie des polymères et des microémulsions permet également le remplacement par des composés organiques des matériaux d'origine mi-

nérale : collage/soudure, plastiques/alliage léger, peintures et protections. D'une manière générale, ces systèmes peuvent être combinés avec d'autres, issus du monde inorganique, pour donner des matériaux composites fluides ou solides. C'est le cas des suspensions (boues, latex, fluides rhéoelectriques) et de certains films issus de suspensions, des céramiques, des composites solides (fibres de carbone, composites pour le bâtiment, ...) avec de nombreuses applications pour l'agro-alimentaire, la pharmacie, la cosmétologie, l'aérospatiale et l'automobile.

La facilité avec laquelle les systèmes "mous" répondent à des champs extérieurs et leurs propriétés optiques en font des matériaux de choix pour l'optoélectronique et l'optique non linéaire.

20 à 30 % du PNB des Etats-Unis provient de matériaux obtenus par des voies catalytiques (pétroles, chimie de base, polymères, produits pharmaceutiques, produits agrochimiques...); l'importance de la catalyse hétérogène dans ce type de procédé est déterminante : elle le sera de plus en plus dans les domaines des molécules biologiquement actives, de l'énergie et de l'environnement.

La maîtrise et l'optimisation de nombreux procédés de traitements de surface (dépôts, oxydation, passivation, attaque), de même que les phénomènes de corrosion et d'inhibition de la corrosion, dépendent de la formation de couches interfaciales.

# EVOLUTION ET TENDANCES

## 1 - HISTORIQUE

Le développement des techniques ultra-vide (mieux que  $10^{-10}$  Torr), stimulé par la NASA pour le programme spatial, a permis une percée rapide de l'étude des surfaces et des interfaces durant ces

vingt dernières années. Un des aboutissements de ces recherches s'est concrétisé par les méthodes de croissance par jets moléculaires qui depuis les années 1980 ont donné un nouvel élan à la physique des semiconducteurs avec, notamment, la réalisation de gaz électroniques bidimensionnels de très hautes mobilités et de superréseaux. Ces matériaux ont donné des résultats spectaculaires tant en physique fondamentale (effet Hall quantique, cristallisation de Wigner) qu'en physique appliquée (laser à puits quantique, transistor TEGFET). Les dépôts hors ultravide (ablation laser, dépôts plasma) de couches minces ont également fait de gros progrès, citons les multicouches magnétiques, les perovskites, les siliciures.

La lithographie optique a débuté dans les années 1960 pour la réalisation des premiers circuits intégrés. Dès les années 1970 la lithographie électronique a montré sa capacité à réduire les dimensions vers  $0.1 \mu\text{m}$ . Dans les années 80, la lithographie électronique haute résolution démontrait la réalisation de trait de  $10\text{\AA}$ . Parallèlement se développaient des techniques annexes de transfert de la lithographie (gravure ionique réactive) et la recherche vers de nouvelles techniques (lithographie X)

Les premières études menées sur les agrégats ont porté sur des agrégats non-triés en masse sur supports. Des difficultés d'interprétation dues aux effets du support et aux effets de moyenne sur les tailles ont entaché les premiers résultats. Les techniques de jets moléculaires ont permis dans les années 1970 un rapide développement de ce thème en étudiant les agrégats libres puis triés en masse (1980) et déposés en douceur sur des substrats.

Ce développement des sources d'agrégats a également permis d'obtenir une très large gamme de projectiles suffisamment stables pour être accélérés dans des machines conventionnelles. Il ouvre une nouvelle voie dans la détermination des stéréostructures par explosion Coulombienne. Dans les années 70, des effets collectifs avaient été observés avec des projectiles moléculaires, notamment dans le ralentissement des fragments dans la

matière et dans les taux d'émission secondaire. On s'attend a priori à des effets collectifs beaucoup plus importants avec des agrégats qu'avec de simples ions moléculaires

En agronomie, les agrégats aromatiques ont permis d'expliquer l'observation inattendue de la température de couleur très élevée du rayonnement de la matière interstellaire (satellite IRAS 1984).

La supraconductivité granulaire étudiée dès les années 1970 a trouvé dans le domaine des supraconducteurs à haute température critique une résonance très importante.

Depuis les années 1940, la chimie et la physico-chimie étaient seules à s'intéresser à la "matière molle" qui paraissait formée de systèmes trop complexes pour beaucoup de physiciens. La fin des années 60 et le début des années 70 ont vu un fort renouveau de la recherche dans le domaine des cristaux liquides et des polymères. Sous l'impulsion de l'industrie du pétrole et par l'intermédiaire des microémulsions, l'activité sur les systèmes colloïdaux a aussi été renouvelée. La maîtrise des notions de désordre, de connectivité, de transition de phases, d'invariance d'échelle a permis une approche quantitative de cette matière partiellement organisée et une synergie fructueuse entre physiciens et chimistes,

## 2 - PROBLÉMATIQUE ACTUELLE

### Physique et chimie du solide

Le transport électronique dans les systèmes mésoscopiques est maintenant relativement bien compris dans le régime métallique. L'extrême sensibilité de ces systèmes à leur configuration microscopique permet de les utiliser comme outils pour l'étude du désordre par exemple pour les systèmes verre de spin. Les efforts théoriques et expérimentaux s'attachent désormais au régime isolant dont on n'a pas encore, même dans les systèmes macro-



scopiques, une bonne compréhension. Le rôle des interférences quantiques dans les théories dites de chemins dirigés éclairent sous un jour nouveau le régime isolant.

L'étude des courants permanents dans les anneaux mésoscopiques constitue une étape importante de la compréhension des systèmes mésoscopiques dans la mesure où il s'agit de systèmes isolés à l'équilibre pour lesquels les problèmes de dissipation sont encore mal connus. Les prédictions théoriques ne sont pas en bon accord avec les premiers résultats expérimentaux, les rôles du désordre et des interactions électron-électron ne sont pas encore clarifiés.

Les jonctions tunnel nanométriques qui très récemment ont démontré leur sensibilité à la charge d'un unique électron (blocage de Coulomb) sont l'objet de nombreux travaux tant au niveau fondamental avec le cas des paires de Cooper et des quasi-particules de l'effet Hall Quantique Fractionnaire, qu'en vue de l'application à des circuits à très haute intégration.

Les réseaux supraconducteurs qui sont des grilles formées de filaments submicroniques dont la maille est inférieure à la longueur de cohérence, sont des systèmes modèles pour l'étude des frustrations induites par le champ magnétique. La conservation de la cohérence électronique sur une ou plusieurs mailles du réseau donne lieu à des effets d'interférences caractéristiques de la topologie du réseau qui peuvent affecter de façon spectaculaire les propriétés macroscopiques.

La fabrication de fils et boîtes quantiques dont la taille et la qualité des interfaces sont extrêmement bien, contrôlées, est d'une importance considérable pour les développements potentiels en optoélectronique et en électronique. On s'attend à une amélioration du rendement, une diminution du bruit et des signaux de commandes. On peut, par exemple, citer l'utilisation de structures à double barrières utilisant l'effet tunnel résonant. La croissance cristalline sur faces vicinales ou structurées est une voie actuellement très étudiée. Les gaz bi-

dimensionnels d'électrons de très hautes mobilités, obtenus à l'hétérointerface de semiconducteurs, sont des matériaux de choix pour l'étude de l'effet Hall Quantique Fractionnaire qui n'est toujours pas bien compris et des systèmes balistiques plus particulièrement dans le régime de chaos quantique.

Les mécanismes de croissance des films minces (couche par couche, en îlots, ...), les contraintes dans les couches hétéroépitaxiées et le relâchement de ces contraintes au-delà d'une certaine épaisseur de film (dislocations, fractures, ...), sont des problèmes étudiés tant au niveau expérimental qu'à celui des applications. Notons aussi la formation de composés hors d'équilibre par des techniques de faisceaux d'ions : implantation, mélange de couches, amorphisation ou recristallisation, formation de traces mésoscopiques de symétrie axiale lors du passage d'ion, lourds énergétiques.

L'existence des supraconducteurs à haute température repose des questions sur les mécanismes à l'origine de la supraconductivité. La difficulté majeure est d'établir le distinguo dans la phénoménologie entre ce qui est d'origine microscopique et ce qui est lié aux effets mésoscopiques de la granularité ou du désordre. La rencontre entre la physique des systèmes désordonnés et celle des supraconducteurs idéaux devient nécessaire.

L'étude des particules magnétiques permet d'aborder les phénomènes de cohérence quantique en magnétisme. On peut citer par exemple l'observation récente d'effet tunnel macroscopique dans des particules ferromagnétiques et antiferromagnétiques. On peut s'attendre à la découverte de nouveaux phénomènes liés à la coexistence (interactive ?) d'effets quantiques associés à différents paramètres d'ordre (couplés ?).

## Agrégats

Les problèmes technologiques, et plus particulièrement de ségrégation en masse, sont fondamentaux, notamment pour les études des structures

électroniques, des structures géométriques et de leurs relations en fonction de la taille et de l'énergie interne. Les propriétés dynamiques et thermodynamiques des agrégats libres ou supportés sont les objectifs de nombreux projets, il s'agit d'étudier la réponse à divers sources d'excitation : électrons, atomes neutres, particules chargées, rayonnement électromagnétique, ... Et ceci sur une dynamique de taille de plus en plus grande.

Pour les agrégats en tant que projectiles, il s'agit d'explorer les effets de taille, de vitesse incidente, de charge et de structure incidente sur l'interaction agrégat-solide ainsi que la fragmentation en vol induite par traversée de feuilles minces ou de cibles gazeuses.

La fabrication d'agrégats supportés est un enjeu majeur pour lequel il ne suffit pas de produire des agrégats bien définis, mais il s'agit également de les ordonner en un réseau tridimensionnel pour former de nouveaux matériaux. Dans le cas des nanocristaux semiconducteurs de nouvelles méthodes de croissance sont développées, afin de mieux réduire la taille des cristaux, de mieux contrôler leur dispersion et d'augmenter leur concentration. On tente d'interrompre la croissance des cristaux, de les inclure dans des milieux nouveaux (des gels, des polymères, ...). La synthèse récente d'agrégats géants CdS dans une matrice de zéolites en est un bon exemple.

Dans le domaine des matériaux composites formés d'alliage de nanocristaux immiscibles, de nombreuses recherches se développent. Citons l'exemple des composés FeCu qui allient la ductibilité et la conductivité thermique du cuivre au magnétisme du fer.

## Matière molle

La séparation traditionnelle suivant l'architecture moléculaire des constituants cache en fait une assez grande universalité - qui est en train de se dégager - des structures obtenues à l'échelle mésoscopique dans ces systèmes. Aux structures cristal-

lines déjà mentionnées (cristaux colloïdaux, phases bleues), il faut ajouter les cristaux liquides. Certaines de ces structures sont bien comprises, mais d'autres posent encore des questions fondamentales et des structures originales sont encore à découvrir. Parmi les découvertes récentes, on peut mentionner les smectiques torsadés, analogues des supraconducteurs de type II, et les liquides ferro et antiferro-électriques. Ces structures peuvent aussi bien être obtenues avec des matériaux mésomorphes, des lyotropes ou des polymères. Un autre type de structure originale est obtenue par l'existence d'une connectivité à longue distance. C'est le cas des gels - constitué de molécules formant un réseau tridimensionnel désordonné mais assez rigide - et des mousses. Ces structures peuvent n'exister qu'à une échelle locale. A très grande échelle, le système ne peut se représenter comme un liquide ordinaire. Cette structuration à une échelle mésoscopique donne alors des comportements extrêmement originaux que Ton n'observe pas dans les liquides plus simples. Des exemples de tels "liquides complexes" sont obtenus à partir de lyotropes (microémulsions, phases éponge, polymères vivants).

Toutes ces structures sont essentiellement tridimensionnelles. Les mêmes considérations peuvent être faites pour des systèmes bidimensionnels, notamment ceux obtenus à partir de systèmes lyotropes. Les problèmes à connotation plus appliquée, comme le mouillage et l'adhésion ont atteint un stade de maturité permettant des études très fondamentales. Les qualités adhésives de certains polymères commencent, par exemple, à être comprises quantitativement.

Pour importante qu'elle soit, la connaissance de l'architecture et des propriétés statiques de ces systèmes ne suffit ni à les caractériser, ni à cerner leur intérêt. C'est souvent dans leur comportement dynamique que les effets les plus spectaculaires sont observés. Par exemple le mouillage et le démouillage, les problèmes d'adhésion, le frottement ne prennent tout leur sens que dans une perspective dynamique.

Des concepts déjà anciens développés dans les problèmes de séparation de phases (décompo-

sition spinodale, nucléation) sont toujours utiles. L'étude des transitions de phase (dans les colloïdes par exemple) ou de connectivité (dans les gélifiants) loin de l'équilibre, par exemple sous cisaillement, ouvre de nouvelles perspectives. Elle permet de considérer les systèmes rhéofluidifiants et rhéoépaississants sous un jour nouveau (exemple typique de problème d'évolution non-linéaire)

Un des problèmes les plus actuels de cette dynamique non-linéaire est celui de l'auto-organisation, qui permet d'aborder des problèmes comme l'agrégation, la filtration, le mûrissement des mousses, les écoulements des poudres, les problèmes d'avalanche, de fracture et même de broyage.

Les progrès spectaculaires de la biologie dans la connaissance et la maîtrise de certaines structures qui s'assemblent spontanément, comme les filaments d'actine et de tubuline du cytosquelette, ouvrent la voie à un nouveau champ d'expérimentation et de réflexion pour les physiciens.

## Mécanique et tribologie

Les limites technologiques imposées par les matériaux de structure sont très nombreuses : on souhaite disposer de matériaux plus légers, résistants à des températures plus élevées, dans des ambiances plus agressives et présentant des propriétés mécaniques intrinsèques et une fiabilité toujours meilleures.

La mécanique des matériaux - hétérogènes par nature - se propose de prévoir leur comportement mécanique à partir du comportement de leurs constituants, des interfaces et de l'arrangement géométrique de ces constituants. La mise au point de modèles, intégrant ces paramètres, vise à permettre un dialogue entre élaboration et propriétés d'emploi, allant vers une véritable capacité à mettre au point des matériaux sur mesure. Le développement de méthodes de fabrication de pièces directement à partir des constituants du matériau, sans passer par un demi-produit, et permettant d'adapter la

composition et la structure aux efforts subis par les diverses parties de la pièce, ne fait que renforcer la nécessité de cette démarche.

Une étude globale d'un problème de tribologie nécessite l'analyse de trois points. Tout d'abord l'identification et la simulation de l'organe mécanique, puis l'analyse des conditions de fonctionnement des "premiers corps"<sup>11</sup> en contact, enfin la caractérisation du comportement des films interfaciaux. Les développements récents de l'expérimentation (microscopie champ proche, nanotribomètres) et de la modélisation moléculaire ouvrent aujourd'hui des perspectives nouvelles. Leurs progrès conjoints et leur mise en œuvre dans des situations et des géométries adaptées aux problèmes de contact devraient conduire à des avancées importantes dans des domaines variés de la science des matériaux. Citons, à titre d'exemples, le frottement d'un joint de grain d'un métal, la tête de fracture d'un corps ionique et l'interface d'une micro-fibre de céramique avec sa matrice.

Toutefois, l'exploitation de ces résultats à l'étude d'un contact entre deux pièces d'un organe mécanique passe également par une remontée d'informations à l'échelle macroscopique. Or ces problèmes de changements d'échelle, bien maîtrisés aujourd'hui par les mécaniciens sur des échelles plus macroscopiques (homogénéisation et passage micro-macro), posent encore de nombreux problèmes lorsque les échelles microscopiques ne ressortent pas de la mécanique des milieux continus.

L'étude des structures superficielles et de leur évolution (écrouissage superficiel des matériaux métallique) doit permettre de préciser les conditions initiales avant rémission des particules d'usure. L'analyse du matériau de l'interface ou troisième corps (composition physico-chimique de ses constituants, structure) doit être relié à une analyse de son comportement mécanique.

Les effets de synergie, sollicitation mécanique/environnement sont considérables. Ils sont cependant mal compris et beaucoup trop peu étudiés. C'est également le cas des interfaces dont on



est loin de savoir bien les utiliser, Il est, par exemple, nécessaire de prendre en compte les interfaces dans les modélisations permettant de passer de l'échelle des constituants (micro) à l'échelle homogénéisée (meso).

## Chimie interfaciale et catalyse

Les développements récents des sondes locales *in situ*, qui ont tout juste commencé à donner des résultats pertinents en électrochimie interfaciale, ouvrent incontestablement des perspectives excitantes pour suivre, à des échelles relativement fines, de nombreux processus d'électrode.

Un grand intérêt se manifeste actuellement pour la mise en œuvre de réactions électrochimiques ou photoélectrochimiques comme techniques de microfabrication : attaques ou dépôts très localisés à l'échelle nanométrique, réalisation de structures métalliques multicouches grâce à des dépôts par courant puisé. Par ailleurs, l'extension des phénomènes de dépôt en sous potentiel à des composés comme GaAs ou CdTe, conduit au développement de l'épitaxie en couche atomique par voie électrochimique (ECALE).

L'application de contraintes mécaniques à des électrodes conduit souvent à des effets souvent imprévisibles sur la cinétique des réactions interfaciales. Là encore, les effets de synergie interface/environnement sont considérables.

L'électrochimie en milieu diphasique demanderait aussi des efforts pour mieux connaître les distributions de potentiel ou de charges superficielles (suspensions, dégagement gazeux) afin de mieux maîtriser par exemple l'incorporation de suspensions lors de la formation de composites.

Par ailleurs, les hétérogénéités de structure à longue distance (joints de grains, pores, fissures, ...) jouent un grand rôle dans les déplacements ioniques et donc influencent la conductivité des électrolytes solides (amorphes, verres, polymères...). La caractérisation de la géométrie et de la connecti-

té de ces microdomaines est donc d'une grande importance pour la préparation de nouveaux électrolytes solides.

En ce qui concerne la catalyse, les éléments de réponses aux problèmes posés se situent dans la modélisation du catalyseur et de son mode de fonctionnement. Celle modélisation nécessite tout d'abord un bon contrôle des surfaces (propreté, structure) et de la chimisorption successive des réactifs sur ces surfaces. L'étude des interactions entre les complexes organométalliques avec les surfaces (oxydes, métaux, zéolithes) permet de modéliser les sites actifs des catalyseurs hétérogènes et les chemins réactionnels ainsi que de déterminer les étapes élémentaires de la catalyse hétérogène.

L'élaboration de systèmes modèles est également une étape importante : agrégats d'oxydes, de sulfure, de carbure et de nitrure. Agrégats organométalliques de haute nucléarité pour simuler la structure et la réactivité des petits agrégats métalliques de la catalyse hétérogène.

La chimie analytique moderne a permis de percevoir au niveau moléculaire le mode de fonctionnement de certains systèmes du vivant : photodissociation de l'eau, photosynthèse, enzymes mono-oxygénases. Bien qu'ils aient des méthodes de pensée très différentes, le transfert des concepts de la catalyse enzymatique à la catalyse hétérogène pourraient donner des résultats spectaculaires,

## 3 - INTERDISCIPLINARITÉS

Ce sont des systèmes de choix pour les rencontres entre disciplines qui interagissent peu jusqu'à présent. Les interactions se font aussi bien au niveau des concepts que des techniques de fabrication et de caractérisation.

On assiste à des convergences de concepts qui, au départ, semblent très éloignés et, en tous cas, emploient des langages très différents. En effet, certains systèmes mésoscopiques peuvent être étu-

diés soit comme une grosse molécule, cas extrême de la physique moléculaire, soit comme un très petit solide, cas extrême de la physique de la matière condensée. Des concepts totalement nouveaux peuvent émerger de ces interactions.

Les développements théoriques de la physique nucléaire ont été utilisés avec succès. Les modèles utilisés pour décrire la structure des noyaux ont été transposés pour les agrégats. Ceci a permis la description des structures de couches (nombres magiques), excitations collectives, déformations statiques dans les agrégats métalliques. La théorie des matrices aléatoires développée pour décrire les spectres d'excitations des noyaux complexes a été utilisée également avec succès pour le calcul des fluctuations universelles de conductance dans les nanostructures. Il est intéressant de noter que les forces en présence sont très inférieures à celles de la physique nucléaire, et que des régimes inaccessibles à celle-ci ont pu être réalisés dans le cas des systèmes mésoscopiques et ont apporté des confirmations expérimentales de certaines prédictions théoriques (supercouches dans les agrégats métalliques, effet de brisure de symétrie sur la statistique des fluctuations de conductance).

Au niveau des modélisations, les techniques de dynamique moléculaire (Monte Carlo, approches semi-classiques par fonction de distribution pour décrire les effets collectifs) sont également utilisées.

Dans le domaine des milieux mal organisés et des fluides auto-organisés, les progrès de la chimie (meilleure maîtrise de la fabrication) et les progrès des techniques expérimentales d'analyse se conjuguent pour conduire à une meilleure connaissance de ces systèmes. Ceci induit un fort développement de modélisations physiques précises de ces systèmes. Le domaine devient un lieu de rencontre privilégié entre mécaniciens, physiciens, chimistes et maintenant mathématiciens appliqués et biologistes.

Enfin la physique statistique a trouvé dans ce domaine un système de choix pour l'étude des transitions de phase dans les systèmes finis.

Les moyens d'observation sont évidemment le trait d'union le plus important entre toutes ces disciplines. On a maintenant couramment accès expérimentalement à des entités qui n'étaient, il y a peu, que des objets modèles pour les théoriciens : bords de marche, crans, adatoms... Les progrès pour ce qui concerne les techniques de diffraction (microscopie électronique, rayon X, électrons lents, atomes d'Hélium très lents) concernent d'une part les performances des appareils (longueur de cohérence pour les électrons lents et les atomes d'Hélium, utilisation systématique du rayonnement synchrotron pour les X rasants, observation *in situ* sous ultravide pour la microscopie électronique), mais aussi la qualité de l'analyse des raies de diffraction. On étudie maintenant couramment les transitions de phase bidimensionnelles, on détermine leur ordre, on met en évidence les effets dynamiques (décomposition spinodale), on observe les ondulations de bord de marche, les parois de domaines...

Dans l'espace réel, les études par Faisceaux d'ions (canalisation) permettent de localiser les positions moyennes des atomes et la dispersion autour de ces positions avec une précision de l'ordre de quelques centièmes d'Angström. Des informations de même type sont obtenues par création d'ondes stationnaires de rayon X et par l'étude de la structure fine de l'absorption X (EXAFS). La composition atomique des surfaces est obtenue avec une grande précision et sensibilité tant par spectroscopie Auger que par les techniques de faisceaux d'ions. Très récemment de nouvelles voies ont été ouvertes par les techniques de champ proche (microscopie tunnel, force atomique, force magnétique, tunnel optique...). On observe maintenant couramment à température variable des surfaces avec une résolution atomique. Il faut noter toutefois que ces techniques moyennent beaucoup dans le temps. Des informations complémentaires, fournies par des techniques macroscopiques qui intègrent sur une plus grande surface des informations chacune instantanées, sont donc nécessaires.

## PLACE DE LA RECHERCHE FRANÇAISE

C'est essentiellement dans les organismes publics tels que le CNRS, l'université et le CEA que la recherche fondamentale est conduite. D'une manière générale, le niveau français est de bonne qualité tant au niveau européen qu'au niveau international.

Dans le cas des agrégats libres, la France a été un des moteurs de l'expansion de ce sujet en Europe, avec l'Allemagne et la Suisse, dans les années 1975-1980. Ce rôle de tout premier plan s'illustre dans l'organisation de la première série de conférences internationales sur ce sujet (Lyon 1976, Lausanne 1980, Berlin 1984, Aix-en-Provence 1988, Constance 1990). Le thème s'est ensuite développé aux Etats-Unis et au Japon où de nombreux groupes se sont créés, tant privés que nationaux. Actuellement la situation de la France est au niveau de celle de l'Allemagne, représentant à elles deux 70% de la contribution européenne. Les groupes français sont plus tournés vers les aspects fondamentaux, alors que leurs collègues américains et japonais sont nettement plus impliqués dans les applications industrielles. Cet état de fait est vraisemblablement dû à la quasi-absence d'industriels français dans ce domaine. L'existence d'agrégats aromatiques interstellaires est une découverte française et est considérée comme une des plus importantes de l'astronomie de ces vingt dernières années. La France reste au tout premier plan dans ce domaine.

Dans le domaines des microstructures, les moyens investis par le CNRS ont permis à la France d'être au tout premier niveau international. Ces dispositifs sont lourds et coûteux et donc limités en nombre. On ne peut que regretter que ces laboratoires, qui ont acquis un savoir faire technologique très pointu, ne soient pas plus sollicités par les autres laboratoires pour partager cette compétence dans des actions communes, l'accueil de visiteurs..., etc. La croissance des semiconducteurs a vu égale-

ment un important effort des industriels (Thomson, CGE) et du CNET qui ont senti là un enjeu technologique majeur. Le prolongement de cet enjeu que sont les composants à faible dimensionnalité est assez bien soutenu tant du côté du CNRS et des grands organismes publics de recherche (tel que le CNET) qui jouent leur rôle concernant les études fondamentales et les aspects amonts en technologie et en caractérisation, que du côté industriel.

Les activités en Surfaces, Interfaces, Electrochimie interfaciale sont en France assez bien développées dans l'ensemble du domaine de la matière condensée. Ces activités sont assez bien réparties sur l'ensemble du Territoire et les problèmes de décentralisation ne semblent pas aigus. Les sujets abordés sont souvent très pluridisciplinaires, à la frontière de la Physique et de la Chimie du Solide, et de très nombreux contacts ont été établis entre physiciens et chimistes, dépassant les frontières des Départements Scientifiques et même des sections pluridisciplinaires du Comité National.

Une des caractéristiques des activités développées dans ce secteur est une très grande diversité des équipements, allant du petit dispositif local à la mise en œuvre de grands équipements. La France, sur ce plan, est bien dotée, que soit au niveau du rayonnement Synchrotron (LURE et bientôt ESRF) ou des neutrons (LLB et ILL).

Les activités sont en général de bon niveau et au point de vue de l'impact international se situent plutôt mieux que la moyenne de la recherche française. Ainsi, le pourcentage d'articles français publiés dans des revues correspondant à ce domaine atteint 10%.

L'activité de la communauté française dans le domaine de la matière molle (chimie aussi bien que physique) est largement reconnue à l'étranger. Le retard en spectroscopie X haute résolution est en train d'être comblé. L'interdisciplinarité a, là encore, joué un grand rôle, le couplage chimiste/physicien, notamment, est souvent envié par nos collègues anglosaxons. L'expérimentation française est caractérisée par un choix astucieux des expé-



riences, mais une technologie et des moyens quelquefois moins sophistiqués que dans certains pays.

Dans le domaine de la mécanique des matériaux, et singulièrement dans celui du passage micro-méso-macro, la recherche en France se situe au meilleur niveau international, que ce soit au plan théorique ou au plan expérimental. On constate cependant, et on ne peut que le déplorer, que cette place n'est que partiellement reconnue du fait probablement d'une faiblesse de la politique de publication et aussi d'un certain ostracisme des Anglo-saxons que Ton retrouve dans d'autres disciplines. Les exemples ne manquent pas de "découvertes" américaines ou japonaises sur des sujets largement éclaircis par des équipes françaises depuis dix ans. La pierre d'achoppement pourrait être dans l'élaboration des matériaux. En effet, l'élaboration des matériaux n'est pas une discipline à part entière comme le sont les *"Matenais Sciences"* aux Etats-Unis ou au Japon. C'est une recherche mal reconnue, mal récompensée et donc qui n'attire pas les meilleurs jeunes chercheurs.

## THEMES EN EMERGENCE

Nous citons ici, sans les développer, les thèmes qui nous paraissent les plus importants à entreprendre ou à soutenir. Nombre de ces thèmes ont déjà été abordés dans les paragraphes précédents.

### *Dynamique des systèmes hors équilibres*

Propagation de fissure, front de croissance, transition de phase.

Fragmentation d'agrégats, matière sous impact d'agrégats.

Collision d'agrégats libres.

Synthèse d'états métastables : irradiation, choc, cisaillement.

Rhéologie de systèmes complexes : poudre, gel, suspension colloïdale, fluides auto-organisés.

Processus nouveaux apparaissant lors de l'isolement extrême des agrégats (milieu interstellaire).

### *Structures artificielles*

Fabrication de fils et boîtes quantiques pour l'optoélectronique et la microélectronique, Epitaxie sur face microstructurée, nanocristallite. Nouveaux objets de la nanoélectronique : transistor à un seul électron, écluse à électron, ...

Multicouches : magnétique, métal-semiconducteur, organique-inorganique.

Synthèse de nouvelles molécules et agrégats triés en masse, température et charge. Fullerènes, dendrimère et autres objets de l'ingénierie moléculaire.

Matériaux à gradient de propriétés et nanocristallins.

Réseaux de jonctions Josephson submicroniques (fluctuation de charge et de phase, diagramme de phase. Systèmes hybrides mettant en jeu des structures mixtes magnétiques et supraconductrices.

Particules magnétiques (effet tunnel macroscopique dans des particules ferromagnétiques, magnétorésistance, effet magnétocalorique, rôle de la dissipation).

Membranes céramiques et composites à forte résistance chimique et thermique.

### *Réactivité chimique et électrochimique*

Propriétés catalytiques des agrégats supportés (métalliques triés en masse, oxydes, sulfures, organométalliques) et de petites particules colloïdales.

Propriétés de transport atomique dans les couches minces.

Milieux diphasiques, répartition de charge, de potentiel (bulle, suspension, membrane).

Effet de synergie : sollicitation mécanique et environnement (microfissuration).

Rôle de la micromorphologie de surface sur la réactivité (marche, trou).

### ***Structure électronique, phénomènes de transport et propriétés optiques***

Structure électronique des agrégats métalliques (couche, supercouche, déformation), des superréseaux semiconducteurs, magnétiques et supraconducteurs.

Transport quantique - chaos quantique dans les systèmes balistiques, électronique monoélectron, électronique interférentielle, électronique moléculaire.

Propriétés optiques des systèmes confinés, phénomènes non linéaires, modes collectifs dans les agrégats, origine des bandes diffuses interstellaires, silicium poreux.

### ***Relations entre les propriétés mécaniques des constituants et les propriétés globales des matériaux***

Effet du désordre : morphologie, distribution spatiale.

Rôle des interfaces : joint de grain, joint de phase, interface renfort-matrice dans les composites.

Comportement intrinsèque des constituants dans le matériau.

### ***Tribologie***

Comportement mécanique des solides sous très forte pression et très fort taux de cisaillement (relation avec l'abrasion et la fatigue).

Ductibilité et fragilité des couches minces (épaisseur inférieure au micromètre).

Etude fondamentale de l'usure (approche statistique, effets d'échelle, rôle des rugosités, circulation des particules d'usure dans un contact)..

### ***Stéréostructure des surfaces et des agrégats***

Relation structure électronique et densité d'état de surface et reconstruction cristallographique.

Structure spatiale des agrégats.

## **DISPOSITIF ET RECOMMANDATIONS**

D'une manière générale, il faut maintenir le rôle de la recherche française à son bon niveau actuel. Ceci nécessite un soutien humain et financier des équipes déjà en place ou en cours de développement, en tenant compte de la qualité de l'environnement scientifique et industriel. La stabilité des équipes est manifestement un atout considérable à préserver. Elle seule permet un effort de prospective à long terme.

Les équipements devenant mi-lourds et à haute spécificité (lasers temps court, source VUV, analyse de surface, salle blanche de technologie, épitaxie par jet moléculaire...) et nécessitant parfois l'utilisation de plus grands instruments (synchrotron, accélérateurs, techniques RPQ, ...), il faut faciliter la mobilité des équipes autour de centres présentant un savoir faire et un équipement original (séjours de courte durée, création de chambres pour visiteur). Ce brassage de culture scientifique est très favorable à l'interdisciplinarité et au dynamisme intellectuel garant d'une recherche de très haut niveau.

L'utilisation de ces grands instruments est trop réservée à un club d'initiés et beaucoup de laboratoires ignorent leurs possibilités. Il apparaît que, sans augmenter le nombre de chercheurs permanents auprès de ces instruments, il faudrait encourager l'implication régulière de chercheurs et d'ingénieurs de laboratoires extérieurs dans la réalisation d'expériences complexes. Par ailleurs, il faudrait améliorer l'information quant aux possibilités de ces instruments.

Les relations CNRS-industrie sont toujours trop confidentielles. Dans le cas des agrégats,

par exemple, il faut motiver les industriels français, actuellement intéressés par le sujet, mais encore dans l'expectative, à l'opposé des industriels allemands ou japonais. Les créations d'unités mixtes, telle Saint-Gobain/CNRS et le succès qu'elles ont obtenu incitera peut être davantage les collaborations entre ces deux partenaires.

**Dominique Mailly**  
*Président du groupe 07*



# 08

## PHYSIQUE ET CHIMIE DU SOLIDE

### INTRODUCTION

La physique et la chimie du solide sont clairement en amont et en large recouvrement avec la science des matériaux synthétiques ou naturels et, par voie de conséquence, en recouvrement avec les géosciences. La notion de matériaux est par essence fédérative de compétences variées; elle recouvre le corps simple ou composé (structure, composition, défauts) et sa finalité liée à un comportement physique (notion de propriétés) et à une mise en forme sur un site d'utilisation. La physique et la chimie du solide sont concernées au premier chef par les deux premiers aspects et sont naturellement appelées à nourrir d'étroites relations. Celles-ci existent et sont fructueuses dans un certain nombre de domaines qui seront mentionnés dans ce rapport. Il a été constaté qu'elles ne sont cependant pas aussi développées, généralisées et harmonieuses qu'il serait souhaitable qu'elles le fussent. Une des interrogations centrales de ce rapport consiste justement à essayer de définir les conditions qu'il serait nécessaire de réunir pour les améliorer. Symétriquement, l'interaction avec les géosciences qui existe depuis longtemps et s'était affaiblie au cours des dernières décennies est en voie de se revivifier au bénéfice mutuel des trois disciplines.

### LES ENJEUX

Les enjeux scientifiques dans le champ de la physique et la chimie du solide sont de trois ordres :

- Imaginer de nouveaux composés chimiques solides basés sur des architectures moléculaires originales et présentant des organisations supramoléculaires de complexité croissante sur des distances variant de l'unité à quelques centaines de nanomètres. Assurer la synthèse de ces composés dans des conditions de mieux en mieux maîtrisées, en particulier pour ce qui concerne le contrôle des défauts. Ces défauts présentent un intérêt en eux-mêmes, ainsi que l'illustre la découverte des matériaux supraconducteurs. Entrent également dans cet objectif de maîtrise accrue lors de la synthèse, les préoccupations d'abaissement des coûts énergétiques, de meilleure gestion des sources de matières premières, de capacité à suivre leurs variations d'accessibilité et de respect de l'environnement en relation avec la production chimique industrielle.

- Proposer et réaliser des associations de ces composés ou des modifications chimiques des solides simples en vue de l'élaboration de matériaux à propriétés spécifiques en relation avec les besoins du génie électrique, électronique, catalytique, civil ou mécanique et de la production des équipements

à bases de composants optiques, opto-électroniques ou magnétiques.

- Caractériser de plus en plus finement et efficacement les propriétés structurales, physiques et chimiques de ces composés et de leurs associations, à la fois dans leur masse et à leurs interfaces et dans de larges gammes de conditions fonctionnelles, en vue d'étendre et d'approfondir la compréhension fondamentale des relations qui existent entre la composition chimique, la structure moléculaire, nano et micrométrique, et les propriétés d'usage,

Il convient de souligner ici combien est désormais essentielle la synthèse de matériaux à structure hautement contrôlée pour que progresse la connaissance sur de nombreux phénomènes relevant de la physique fondamentale de la matière condensée : effet Hall quantique, quasi-cristallinité, supraconductivité, cristal de Wigner.

Les solides concernés ont des caractéristiques extrêmement variables. Ils peuvent se distinguer par le caractère chimique (liaisons ioniques avec éventuellement des ions moléculaires construits autour de centres métalliques par un habillage de ligands, liaisons covalentes, liaisons métalliques). Ils peuvent également se distinguer par leur forme solide (monocristal, cristal irrégulier, grains et poudres, céramiques, verres et amorphes, couches minces et films, composites, verre). Quel que soit le critère retenu pour distinguer les différents types de solides, les composés réels recouvrent sans discontinuité toute l'étendue du spectre. Cette variété illustre l'ampleur du domaine d'études, ses difficultés et l'importance des enjeux associés.

Les enjeux technologiques et économiques sont en relation directe avec ceux de la production industrielle des matériaux traditionnels (meilleur contrôle et extension des propriétés des métaux, alliages, verres, ciments, goudrons, bois...) ou des matériaux dits de haute technologie qui offrent de nouvelles fonctionnalités (semi-conducteurs, céramiques, couches minces, composites...),

Divers champs économiques sont à cet égard particulièrement demandeurs :

- le stockage et la gestion de l'information (solides doués de propriétés optiques, électroniques et magnétiques spécifiques);
- les télécommunications (propriétés optiques et électriques);
- le transport des personnes et des biens (propriétés mécaniques);
- le stockage de l'énergie (propriétés chimiques et électriques);
- l'habitat et les voies de communications (propriétés mécaniques, optiques et de conduction thermique et phonique);
- l'industrie chimique et le génie catalytique, la santé et les biomatériaux de substitution, la maîtrise des rejets industriels (propriétés chimiques et mécaniques);
- la protection de l'environnement (récupération et recyclage des matériaux après usage, traitements et stockage des déchets, en particulier les polluants chimiques et nucléaires);
- les loisirs (propriétés mécaniques et de conduction thermique)...

Une recherche active et compétitive au plan international en physique et chimie du solide conditionne à moyen et long terme la maîtrise d'un développement industriel dans tous ces domaines essentiels à l'activité économique d'un pays tel que la France. Par exemple, la chimie et la physique du solide constituent l'un des fondements du champ des disciplines qui interfèrent dans les domaines de l'électronique, de l'optique et du génie électrique. Il s'agit là de créer des systèmes de complexité croissante capable de capter et de traiter, de plus en plus rapidement, un nombre de plus en plus grand, d'informations en vue de les transformer en action. Une voie est la réduction des dimensions des com-

posants et circuits micro-opto-électroniques. Elle pose des problèmes fondamentaux qui relèvent en premier lieu de la recherche en physique et chimie du solide.

## EVOLUTION ET TENDANCES SCIENTIFIQUES

### 1 - HISTOIRE RÉCENTE DU DOMAINE

La physique et la chimie du solide actuelles résultent d'une évolution marquée. Les chimistes, dits "minéralistes", dans les années 1950, étaient capables de préparer des composés de plus en plus sophistiqués grâce à l'emploi de nouvelles méthodes de synthèse et ils expliquaient, le plus souvent de façon imparfaite, leurs propriétés physiques de manière empirique en procédant par analogie. La description d'un matériau à l'aide d'un modèle ne leur était pas familière. Les physiciens du solide, de leur côté, étudiaient avec beaucoup de soin et de minutie des matériaux peu nombreux, souvent des métaux et leurs alliages, dont ils ne s'éloignaient qu'avec beaucoup de prudence. Le matériau réel était considéré dans la science académique comme moins noble que le matériau parfait. Aujourd'hui, les chimistes cherchent à pousser plus loin leur effort de modélisation et de compréhension globale et les physiciens sont avides de disposer de solides de caractéristiques beaucoup plus variés pour les étudier en détail, y compris dans des conditions fonctionnelles.

La physique et la chimie du solide sont de plus en plus la science des défauts du solide et l'étude des phénomènes liés à la non-stoéchiométrie, aux lacunes, défauts interstitiels et étendus, trous électroniques, dislocations, intercroissances... Par exemple, l'observation et la connaissance des

défauts permirent la découverte des matériaux supraconducteurs à température critique élevée tel que  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ , oxyde dont l'existence a été mise en évidence par microscopie électronique haute résolution à partir de défauts d'intercroissance dans des cristaux de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ . La nature des choses montre qu'un matériau n'est bien souvent intéressant sur le plan de ses propriétés que s'il possède des défauts. Ainsi, la présence de dislocations dans un cristal lui confère sa plasticité et joue un rôle fondamental dans la détermination des propriétés des métaux.

Les différences qui existent toujours entre physiciens et chimistes du solide, mais qui tentent à s'estomper actuellement du fait d'un langage de plus en plus commun, résultent de l'école de pensée et de la formation de base des uns et des autres : les premiers raisonnent en termes de théorie de bandes (électrons collectifs) et les seconds en termes de liaison ionocovalente (électrons localisés).

### 2 - PROBLÉMATIQUES ACTUELLES ET EN ÉMERGENCE

Plusieurs domaines méritent une attention particulière en raison de leur évolution récente et de leur importance.

#### Le renouveau des méthodes de synthèse en chimie du solide

La synthèse minérale en chimie du solide est marquée par un renouveau associé aux nouvelles techniques : chimie douce ou synthèse dans des conditions propices à l'obtention de composés métastables, transformation à partir de précurseurs moléculaires (procédés sol-gel, pyrolyse de précurseurs polymères) ou solides (réactions d'intercalation, réactions d'échange ionique, dépôt chimique en phase vapeur), synthèse de solides organo-minéraux. Il convient de mentionner également ici les possibilités intéressantes qu'offre la modification chimique du bois,



Les réactions de chimie douce se font à des températures relativement basses. Il devient possible de coupler des entités organiques et minérales au sein d'un même système et ainsi d'élaborer des matériaux entièrement nouveaux. A titre d'exemple, on citera le greffage de molécules organiques sur matrices minérales, la co-cristallisation d'ions organiques et minéraux, la copolymérisation organique et minérale. Dans le premier cas, le principe en est simple : si un solide lamellaire possède sur les faces de ses feuillets des groupements hydroxyles, on peut réaliser des réactions entre ces groupements et des molécules organiques afin de créer de véritables liens moléculaires entre les feuillets, puis doter ces liens de groupements fonctionnels spécifiques. Dans le troisième cas, on étend les possibilités offertes par les dérivés alcoxydes du silicium dans les réactions sol-gel à des dérivés de métaux tels que le titane ou le zirconium. En combinant les diverses associations, on peut ainsi synthétiser des solides de conception entièrement nouvelle comportant des réseaux organiques et minéraux inter-pénétrés.

Cette nouvelle approche de la chimie du solide qui conduit à étudier une poudre, un solide mal cristallisé ou un film mince plutôt qu'un monocristal pose des problèmes de caractérisation qui imposent la mise en œuvre de nouvelles techniques (adsorption X (EXAFS, XANES), RMN du solide, STEM, STM, ...), Le STM et l'AFM, en relation avec les simulations d'images, offrent des possibilités remarquables qui commencent seulement à être utilisées dans la détection ou la manipulation d'atomes ou de molécules isolés sur une surface. De son côté, la microscopie électronique à transmission a connu récemment des progrès spectaculaires : sources d'électrons très cohérentes à moyenne tension (300 kV), optique électronique qui permet la correction des effets de 2ème et 3ème ordre et la mise au point d'une holographie électronique, détecteurs à base de caméras CCD qui autorisent à identifier l'électron individuel. Ils permettent l'acquisition d'informations combinées sur la structure atomique et la composition chimique avec une résolution spatiale de l'ordre de 0,1 nm et une résolution en éner-

gie de 0,1 eV. Ils ouvrent ainsi des perspectives intéressantes pour l'étude des dislocations et des joints de grains.

## L'étude des solides sous conditions extrêmes

L'étude des solides sous conditions extrêmes (température et pression) est en relation avec les études des solides géologiques. Ces études ont conduit à l'émergence d'une discipline nouvelle, la physico-chimie des solides géologiques, qui s'inscrit dans la préoccupation scientifique et humaine actuelle de mieux maîtriser les flux de matière et d'énergie qui constituent notre environnement. Cette discipline est jeune dans son acception moderne et est largement utilisatrice des techniques expérimentales et des outils remarquables mis au point ou en cours de développement par les physico-chimistes de l'État solide : RMN du solide à haute résolution et haute température, diffraction des neutrons et des rayons X à haute ou très haute température et sous pression avec une résolution temporelle pouvant aller jusqu'à 100 ms. Cette dernière possibilité permet l'étude *in situ* de processus de transformations physiques (transition de phase) ou chimiques (réactions solide-gaz, solide-liquide, décomposition thermique). Ce dernier aspect est très important puisqu'il correspond, en termes imagés, au passage de la photographie de l'état solide à sa cinématographie. Mentionnons par exemple les études de réactions à l'état solide Ti+C et Al+Ni par diffraction du rayonnement synchrotron et les études par diffraction et adsorption X de la formation de catalyseurs au cuivre ou au zirconium par décomposition d'un précurseur.

La majeure partie de l'objet Terre est soumise à des conditions de température et de pression extrêmes (quelques milliers de Kelvin et plusieurs dizaines de GPa) , Grâce au développement d'outils expérimentaux nouveaux tels que les cellules à enclume de diamant chauffées par laser, il est désormais possible de synthétiser et de caractériser *in situ* des oxydes d'intérêt géophysique, dans ces conditions extrêmes. De manière plus générale, les

solides naturels offrent une grande variété chimique et structurale associée à une large gamme de propriétés physiques. Ils sont donc appelés à être à l'origine d'idées nouvelles en physico-chimie des solides.

Les propriétés des matériaux géologiques sont souvent inaccessibles expérimentalement. Géophysiciens et géologues ont développé, en collaboration avec physiciens et chimistes, des calculs *ab initio* et des calculs de dynamique de réseau et de dynamique moléculaire (méthode Carr-Parinello, méthode de Monte-Carlo, réseaux d'automates cellulaires) reposant sur des potentiels semi-empiriques ou calculés *ab initio*. Dans bien des cas, les calculs de structures, de dynamique et d'équations d'état sont satisfaisants; ceux des transitions de phases et des phénomènes cinétiques commencent seulement à l'être. Les méthodes théoriques sont également utilisées, souvent à leurs limites, pour prévoir la nature des phases pouvant être stables à haute température et pression. Parce que les solides étudiés sont chimiquement et structuralement complexes, il y a nécessité d'adapter les méthodes théoriques classiques pour qu'elles puissent, être mises en œuvre dans ces conditions. Il est en conséquence souhaitable que la communauté des "théoriciens" se développe et entretienne un dialogue fructueux avec celle relativement plus importante des expérimentateurs.

Sous d'autres conditions extrêmes, la physico-chimie des grains interstellaires est en plein développement. Ce développement est lié à la progression très rapide de l'astronomie infra-rouge qui fait appel aux grands instruments (télescopes, satellites) et dépend pour beaucoup du développement des détecteurs qui utilisent toutes les ressources de la chimie et de la physique du solide. De grands efforts de simulation des conditions astrophysiques en laboratoire ont été entrepris ces dernières années. Ces simulations s'intéressent à la nucléation et à la croissance des grains dans les atmosphères d'étoiles froides et de nébuleuses protostellaires ainsi qu'à l'évolution physico-chimique de ces grains dans les conditions interstellaires. Particulièrement intéressante est l'étude des interactions ma-

tière-rayonnement qui produit ici une chimie considérée comme prébiotique. Bien que ce type d'études soit très fondamental (origine du système solaire, émergence des constituants des systèmes vivants), il convient, de souligner qu'elles rejoignent les travaux sur la fabrication des matériaux en apesanteur qui s'engagent dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne,

Ces derniers points illustrent le caractère très multidisciplinaire du domaine et la nécessité de favoriser les structures d'échanges scientifiques entre les communautés concernées (constitutions de GDR, réseaux de laboratoires, colloques...).

## **Les solides de l'électronique, de l'opto-électronique et du génie électrique**

Les nouveaux matériaux pour l'électronique, l'optoélectronique et le génie électrique, constituent d'une manière générale, un terrain fertile de recherche coopérative pour les chimistes et physiciens du solide. Est-il besoin de rappeler la mobilisation sans précédent des scientifiques qu'a motivée la découverte des supraconducteurs à haute température critique ? C'est sous la forme de films minces que ces nouveaux composés sont sans doute les plus prometteurs, non seulement en raison de la possibilité qu'ils offrent de mieux contrôler les défauts mais également pour les applications potentielles. A cet égard, si les applications sont maintenant envisagées avec prudence, il demeure que des progrès indiscutables ont été accomplis permettant la réalisation de composants déjà opérationnels,

S'agissant de la course à l'intégration, la situation actuelle est encore clairement dominée par les circuits intégrés silicium qui implique l'étude de phénomènes physiques associés à la réduction des dimensions des composants élémentaires et la mise en œuvre de nouvelles technologies avec une orientation marquée vers les procédés "froids" (processus assistés plasma ou photons UV). Cependant les progrès accomplis tant dans les processus d'épi-

taxie que dans les techniques de lithographie permettent de réaliser désormais des monocristaux dont les propriétés cristallographiques peuvent être modulées à la demande et sur des dimensions compatibles avec l'existence d'effets quantiques. Cette ingénierie de la structure électronique alliée aux effets quantiques permet de créer des objets artificiels qui ouvrent un champ d'investigation nouveau de physique fondamentale des solides et des interfaces. Cette évolution remarquable a été possible grâce aux progrès considérables accomplis dans la maîtrise de la croissance des matériaux en couches minces ainsi que dans le contrôle de leurs interfaces. Les chimistes du solide ont largement participé à cette évolution en étendant progressivement leur savoir-faire, initialement surtout appliqué à la cristallographie des matériaux "volumiques", à la maîtrise des méthodes de croissance des matériaux en couches minces (épitaxie par jets moléculaires, en phase vapeur, greffage d'organo-métalliques, dépôts de diélectriques assistés plasma ou photons UV...).

Parmi les nouveaux objets qui présentent des effets quantiques spécifiques, il convient de considérer ce que Ton appelle les nanostructures de semiconducteurs. Elles tracent la voie aux "futurs progrès de l'électronique et de l'optique qui résulteront du confinement des électrons dans des structures à moins de trois dimensions" (*Pour la Science*, 1991). Ces nanostructures sont encore appelées "point quantique" ou "système OD" pour traduire le fait que les trois directions de l'espace sont équivalentes pour le confinement. La modulation de la taille des nanocristaux vers des dimensions inférieures à 3 nm, soit 3 à 4000 atomes, débouche sur une véritable modulation, des propriétés optoélectroniques. Les matériaux modèles sur lesquels des données expérimentales et les modèles théoriques ont été confrontés sont les verres de semiconducteurs ainsi appelés parce qu'ils correspondent à une matrice amorphe dans lesquels des nanocristaux de taille variable peuvent être formés par simple traitement thermique. Les modèles théoriques sont essentiellement basés sur les modèles de masse effective avec une certaine difficulté à traiter les tailles les plus petites (diamètre inférieur à 2 nm pour CdS). Le mo-

dèle de la liaison forte développé plus récemment conduit à un meilleur accord quantitatif.

Deux problèmes limitent encore les possibilités d'application. C'est d'une part la dispersion en taille des nanocristaux et d'autre part les effets de surface (15 % des atomes d'un cristal de CdS de 5 nm de diamètre sont sur la surface). Pour contrôler ces effets, il n'existe pas aujourd'hui de méthode générale mais une série de possibilités parmi lesquelles on peut citer l'incorporation dans une matrice vitreuse ou polymère, et l'utilisation de cages de zéolites avec pulvérisation radio-fréquence.

La fabrication de nanoparticules monodisperses dont la surface puisse être contrôlée est encore un défi. Des résultats significatifs dans ce domaine ne peuvent être obtenus que par une étroite collaboration de laboratoires de chimie et de physique capables de contrôler l'un ou l'autre de ces modes de fabrication, de caractériser les matériaux obtenus et d'analyser plus profondément leurs propriétés. Un important effort théorique pour modéliser ces systèmes *est* aussi nécessaire.

Outre cet aspect spécifique des nanostructures, la très grande richesse des résultats obtenus dans le domaine des semiconducteurs repose sur une maîtrise poussée de l'épitaxie et un gros effort de caractérisation structurale des surfaces et interfaces. Signalons en particulier le développement considérable des techniques de microscopie tunnel et à force atomique pour la caractérisation locale des propriétés structurales et électroniques des matériaux et microstructures semiconducteurs. Les résultats les plus marquants obtenus ces dernières années concernent les hétérostructures à modulation de dopage, les super-réseaux de courte période, le transport perpendiculaire (effet tunnel résonnant), les propriétés optiques sous champ électrique (par exemple localisation de Wannier-Stark). Le rôle croissant des champs intenses ou sources optiques femtosecondes pour l'étude des phénomènes transitoires est à souligner. Les études, concentrées d'abord sur le système modèle GaAs/AlGaAs, s'étendent progressivement à d'autres microstructures semiconductrices : com-



posés III-V, tel que GaAs/GalnAs/InP et composés II-VI tels que CdTe/CdMnTe ou HgMnTe/CdTe. Elles ont permis de reconnaître le rôle fondamental des contraintes dans les propriétés électroniques et structurales des microstructures.

L'étude et le contrôle des propriétés interfaciales de ces structures ainsi que des systèmes métal-semiconducteur et diélectrique-semiconducteur constituent un autre domaine qui a largement profité du rapprochement des physiciens et des chimistes du solide. Mentionnons la passivation des matériaux et composants semiconducteurs et la réalisation de barrière de Schottky ou de contacts ohmiques à base de siliciure. Dans le domaine des capteurs, il faut souligner le développement des matériaux pour composants microioniques compatibles avec les composants et circuits microélectroniques. Un autre débouché important de la microionique concerne également le stockage de l'énergie électrique.

L'intégration des capteurs dans les circuits microélectroniques a son prolongement dans les systèmes de traitement et de transmission optique de l'information avec le développement de l'optique intégrée et de l'optique guidée. Cette tendance a suscité un foisonnement de recherches sur les nouveaux matériaux pour capteurs optiques et sur la synthèse de fibres optiques spécifiques pour capteurs. Le développement de l'optique non linéaire a par ailleurs provoqué l'émergence de nouvelles classes de matériaux (matériaux composites, matériaux photoréfractifs...) ayant potentiellement de larges applications en optoélectronique (fonctions optiques pour l'ordinateur, dispositifs de télécommunications...).

En ce qui concerne le génie électrique, les avancées récentes les plus appréciables touchent les matériaux polymères sous diverses formes (films minces isolants pour réaliser les transformateurs de puissance des TGV, forme massive pour le transport par câbles de l'énergie à très haute tension), les matériaux céramiques (composants de type varistances et thermostances, substrats isolants à forte dissipation thermique) et les matériaux magnétiques.

## **Solides pour matériaux à propriétés optiques spécifiques**

La recherche de nouveaux matériaux inorganiques à propriétés optiques spécifiques connaît actuellement un regain d'intérêt, particulièrement avec les matériaux luminescents dopés par des ions de transition, de terres rares ou lourds. Ce sont typiquement des matériaux recherchés pour leurs applications de très hautes performances. Ils interviennent dans les lasers à longueurs d'ondes fixes (terres rares trivalentes) et surtout accordables dans une large gamme spectrale (chrome III et IV, titane III, cobalt II). Associés à un pompage par des diodes, ils conduisent à des lasers compacts tout solide. Ils interviennent également dans les lasers à *"up-conversion"* dont on exploite les excitations vers les niveaux élevés après pompage dans les niveaux localisés visibles et IR (utilisation en stockage optique) et dans les scintillateurs rapides utilisés en physique des particules et en tomographie médicale.

Ces matériaux sont des matériaux stratégiques pour l'avenir. Les études portent sur les propriétés optiques standards (adsorption, émission de fluorescence, déclins de fluorescence) et les propriétés accessibles par spectroscopie laser et permettant l'étude sélective des sites cristallographiques à symétrie déterminée et la dynamique des états excités. Ces dernières études fournissent des informations essentielles sur les mécanismes de transfert d'énergie entre ions sensibilisateurs et activateurs.

## **Multicouches et super-réseaux métalliques**

Ces structures, synthétisées par empilement séquentiel, à l'échelle du nanomètre, de métaux et d'alliages, de métaux et de terres rares, de métaux et de semi-conducteurs, sont de plus en plus étudiées et révèlent quelquefois des propriétés inattendues. La multiplication des interfaces facilite, dans certains cas, l'étude des interfaces individuelles. Ainsi la diffraction de rayons X, de neu-

trons ou d'électrons, sensible au carré du nombre de ces interfaces, permet une analyse moyenne de leur structure. Un gros effort est consenti pour étudier la structure atomique des empilements périodiques de couches métalliques.

Les multicouches, systèmes artificiels élaborés couche à couche, sans préoccupation d'épitaxie, soulèvent des problèmes fondamentaux concernant les profils de composition et magnétiques, la stabilité et la rugosité des interfaces. La perfection interfaciale est particulièrement souhaitée en vue de la fabrication de miroirs à rayons X ou de miroirs à neutrons. Par traitement thermique ultérieur, ces structures multicouches peuvent produire des phases nouvelles stables, métastables ou amorphes. Ces mécanismes de réaction à l'état solide font l'objet d'études encore trop parcellaires et il serait souhaitable de développer l'analyse de la dynamique d'apparition de phases dans les processus de diffusion-réaction observés dans ces systèmes.

Les super-réseaux métalliques, réalisés par épitaxie, permettent dans certains cas de préparer, sur des épaisseurs nanométriques, des phases métalliques nouvelles. Les conditions d'apparition de ces phases, en liaison avec la nature des composants et les désaccords de maille, se développent rapidement. Les limites physiques de ces possibilités d'épitaxie sont étudiées en détail, ainsi que les défauts (dislocations d'épitaxie, ...) susceptibles de stabiliser ou de déstabiliser ces phases.

Les propriétés magnétiques de ces multicouches ou superréseaux métalliques font l'objet d'études intenses. Soulignons tout d'abord le rôle joué par les couches minces magnétiques (Co/Cr, Co/Ni/Mn, CrO<sub>2</sub>) pour l'enregistrement magnétique et le développement des études sur les couches métal de transition-terre rare, à anisotropie magnétique perpendiculaire, pour réaliser des structures dans lesquelles les domaines magnétiques sont orientés perpendiculairement au film. Cette circonstance permet d'augmenter considérablement la densité de domaines magnétiques. Les propriétés magnétiques des surfaces et interfaces sont encore insuffisamment comprises, expérimentalement ou

théoriquement. Les couplages magnétiques aux interfaces de couches de terres rares et de métaux de transition (Fe/Gd par exemple) permettent de créer des structures ferrimagnétiques à une échelle nanométrique.

Dans les superréseaux métalliques, la possibilité d'augmenter par épitaxie la distance interatomique peut conduire à des phases magnétiques nouvelles. Les phénomènes de couplage entre couches magnétiques séparées par un intercalant magnétique ou non magnétique et conducteur, commencent à être compris en détail. Ces couplages conduisent à des structures magnétiques ferromagnétiques, antiferromagnétiques, hélicoïdales... et révèlent de nouvelles périodicités en ce qui concerne l'interaction magnétique. Certaines multicouches, associations de couches magnétiques et non magnétiques, présentent des propriétés de magnétorésistance géante, liée à une diffusion différente des électrons selon leur spin, sur les couches magnétiques (structures dites spin-valves). Outre leur intérêt fondamental, ces systèmes sont susceptibles d'applications industrielles et de remplacer les têtes de lecture inductives actuelles. Des têtes de lecture magnétique magnétorésistives, utilisant des multicouches magnétiques, pourront permettre d'augmenter considérablement la densité de lecture. Ces têtes magnétorésistives pourront être réalisées en mettant à profit les techniques de fabrication des circuits intégrés de la microélectronique. De nombreux problèmes restent cependant à résoudre : détermination des constituants de propriétés optimales, des épaisseurs suffisantes pour que les effets magnétorésistifs soient observables, de la qualité nécessaire des couches et des interfaces, ... La résolution de ces problèmes passe par une étude fondamentale, expérimentale et théorique, des multicouches magnétiques.

## La métallurgie physique

La métallurgie "traditionnelle" (extraction, élaboration, mise en forme) couvre plutôt les préoccupations du génie des procédés. Par contre, relève de la physique et de la chimie du solide

certaines aspects de la métallurgie qu'il convient de mentionner ici.

La France a toujours été très active dans le domaine de la physique des défauts dans les métaux et alliages, en parallèle avec l'étude des structures électroniques et du magnétisme. Considérons quelques problèmes récents, et tout d'abord celui des dislocations. Si les modèles simples ont été rapidement élaborés avec une grande intuition de 1960 à 1980, des études non analytiques de propriétés plastiques n'ont pu être abordées que récemment avec l'aide de la modélisation numérique : effets de "cœur", alliages concentrés, composés ordonnés à structure complexe... Certains problèmes restent mal résolus au niveau atomique, dans des cas d'application industrielle reconnue, tel que la variation thermique de la limite élastique de superalliage à base Ni ou les dislocations dans les cristaux aperiodiques que sont les quasicristaux. Les ordinateurs permettent désormais de traiter des problèmes non locaux et non linéaires de comportement collectif d'une population de dislocations. On peut espérer à terme résoudre le formidable problème du passage nano (l'échelle de la dislocation) - méso (paquet de dislocations) - macro (loi de comportement mécanique) en dynamique. Des thèmes similaires en rupture dynamique et en statistique de la fissuration en fatigue démarrent et sont très porteurs.

Mentionnons également la théorie électronique des alliages, d'abord dilués et aujourd'hui concentrés, où la France a joué et joue un rôle important. Combinant calcul de densités d'états, physique statistique et méthodes numériques (Monte-Carlo, dynamique moléculaire), on sait aujourd'hui calculer avec une bonne précision des diagrammes d'équilibre à 2 ou 3 constituants. Ces méthodes physiques sont prédictives. Elles complètent les méthodes d'interpolation et semi-phénoménologiques des thermodynamiciens "conventionnels". Enfin, les transformations de phases métalliques, d'intérêt primordial pour le "métallurgiste", s'enrichissent d'une meilleure connaissance de la transition traversée (désordre - ordre, démixtion) et surtout de la cinétique du retour à l'équilibre pour les transforma-

tions par diffusion. Des situations intéressantes (phases percolées, anisotropie) ont été récemment rencontrées. Elles ouvrent le champ à des applications possibles.

Ces domaines de la cohésion métallique théorique sont importants pour le développement de la métallurgie des intermétalliques type alliages ordonnés ( $\text{NiAl}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Ga}$ ,) et des superalliages ( $\text{TiAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ). Ces composés sont l'objet d'un grand intérêt de la part des entreprises aéronautiques et automobiles en raison d'un rapport résistance mécanique/densité très supérieurs aux matériaux actuels. Le problème majeur est leur difficulté de mise en forme et leur fragilité. Il s'agit donc d'identifier les mécanismes de dislocation qui contrôlent les propriétés mécaniques, en particulier dans le domaine des hautes températures.

## Interaction d'ions et de photons avec des solides et des films minces

Soumis à l'irradiation par des ions lourds très rapides (GeV), les matériaux subissent des modifications tout à fait inhabituelles via des mécanismes eux-mêmes inusuels. De telles conditions sont rencontrées dans le sillage des ions qui transfèrent à la cible une énergie supérieure au keV par nanomètre de parcours. Dans les matériaux isolants, mais aussi dans certains alliages métalliques, ce transfert d'énergie conduit à la formation de zones amorphes, ou traces latentes, de plusieurs nanomètres de diamètre. Il est démontré que ces traces n'apparaissent qu'au-dessus d'une certaine valeur-seuil du transfert d'énergie, fonction du matériau, et que leur morphologie évolue avec l'importance de ce transfert, depuis le chapelet de sphères jusqu'au cylindre uniforme. Ces perturbations favorisent également la création de défauts dans les métaux purs augmentant ainsi le désordre de plus d'un ordre de grandeur. Les mécanismes conduisant à de tels désordres ne sont pas encore élucidés malgré le développement de modèles tels l'explosion coulombienne collective ou la pointe thermique,



Dans un autre domaine d'énergie, des phénomènes surprenants tels que l'émission de molécules complexes intactes à partir de solides organiques bombardés par des ions ou des photons a fait surgir il y a quelques années un domaine de recherche qui s'est développé sur des thèmes pluridisciplinaires. Les enjeux scientifiques associés à ce domaine en rapide émergence sont :

- la production et l'identification d'ions moléculaires en phase gazeuse à partir de solides organiques ou bio-organiques bombardés par des ions de moyenne ( $>20$  keV) et grande énergie ( $> 20$  MeV) et par des photons de laser puisés;

- l'étude des phénomènes d'impacts entre des ions-agrégats ou des ions moléculaires et des solides;

- l'accélération d'ions agrégats organiques et métalliques à très grande énergie (dizaines de MeV).

Deux laboratoires sont équipés en France et commencent juste ces développements technologiques (Orsay et Lyon). Le domaine des impacts avec les agrégats lourds et les ions massifs est nouveau et vierge, Les retombées prévisibles sont importantes en biologie (identification de protéines de masse élevée) et en sciences des matériaux. Une instrumentation spécifique a été conçue qui permet depuis deux ou trois ans d'éjecter de surfaces solides des molécules dont la masse dépasse 200 000 Daltons. Ces molécules sont stables et peuvent être accélérées à quelques dizaines de kilovolts. L'impact de plusieurs atomes simultanément sur une surface très réduite est une façon unique de simuler de très intenses courants d'ions. Des effets collectifs très forts sont déjà observés et des modifications de surface et de structure sont attendues avec les agrégats rapides. Les vitesses seront proches de celles des particules de poussières cosmiques induisant l'érosion des véhicules spatiaux. On peut désormais produire en phase gazeuse des ions de masse 50 000 chargés 50 fois plus. Un relativement faible potentiel accélérateur permet d'utiliser ces ions comme projectiles de très grande énergie (plu-

sieurs dizaines voire centaines de MeV), Les densités de puissance déposées en surface peuvent devenir énormes ( $\text{Tw}/\text{cm}^2$ ); elles ouvrent la voie à une nouvelle physique. Après plusieurs mois de préparation, un premier faisceau de  $\text{C}_{60}$  et  $\text{C}_{70}$  à des énergies très grandes (40 MeV) a été obtenu le 7 avril 1992 à Orsay, première mondiale pour un faisceau moléculaire à cette énergie. Ce faisceau est dès maintenant utilisable pour des expériences qui ouvrent des perspectives nouvelles remarquables en physique des interactions particule-solide : 60 atomes entrant simultanément en un même point d'une surface induisent une perte d'énergie pouvant atteindre 7 à 8 keV/A et propre à favoriser l'amorphisation.

## Les solides organiques

Les solides moléculaires sont des cristaux formés par l'assemblage de molécules placées aux nœuds d'un réseau. Leurs propriétés physiques sont la résultante des propriétés des molécules individuelles et de la nature et de la force des interactions intermoléculaires. Ces matériaux peuvent présenter des propriétés optiques intéressantes (non-linéarité) dues à la polarisabilité des molécules.

L'enjeu scientifique principal qui a motivé le développement des conducteurs moléculaires est la possibilité d'y observer de la supraconduction à haute température. Cette suggestion avait été faite en 1964 par Little aux Etats-Unis. Les premiers conducteurs synthétiques sont apparus vers 1973 aux Etats-Unis. Il s'agissait de composés de transfert de charge à empilements colonnaires et ségrégés de molécules cations et anions. Le prototype de tels matériaux est le composé TTF-TCNQ. Il est apparu très rapidement que ces nouveaux matériaux pouvaient aussi constituer un enjeu en recherche fondamentale. À cause de leur caractère de conducteur unidimensionnel, ils présentent un ensemble de propriétés qui avaient été prévues théoriquement, mais pas encore observées, faute de matériaux : transition de Peierls dans un conducteur unidimensionnel, anomalie de Kohn dans le spectre des phonons, conduction de

Frohlich. C'est la découverte et l'étude de ces nouveaux phénomènes qui a réussi à maintenir l'enthousiasme de certains chimistes organiciens et a stimulé l'élaboration de sels organiques conducteurs, appelés sels de Bechgaard.

Grâce à une coopération et une compréhension remarquables entre chimistes et physiciens, la supraconductivité fut découverte fin 1979. Sans vouloir réécrire l'histoire, il est vraisemblable que cette découverte n'aurait pas été faite, ou du moins aurait été retardée, sans la préexistence de cette coopération entre Copenhague et Orsay. En effet, le matériau  $(\text{TMTSF})_2\text{PF}_6$  devient isolant au-dessous de 12K donc apparemment perdu pour devenir supraconducteur. Toutefois, c'est l'existence d'une conductivité à 12K anormalement élevée pour les conducteurs organiques connus à cette époque et la maîtrise des études sous haute pression qui ont permis de découvrir l'état supraconducteur à 1 K au-dessus de 9 kbar. Dans les dix années qui ont suivi, les supraconducteurs organiques se sont enrichis de nouvelles familles présentant le caractère de conducteurs bidimensionnels tels que ceux de la série  $(\text{ET})_2\text{X}$  avec des  $T_c$  montant jusqu'à 12K sous pression ambiante. Les composés à base de molécules fullerène ( $\text{K}_3\text{C}_{60}$ ,  $\text{Rb}_3\text{C}_{60}$ ) supraconducteurs jusqu'à 30K, sont aussi des conducteurs moléculaires qui présentent un lien de parenté étroit avec les composés à squelette fulvalène  $\text{TM}_2\text{X}$  ou  $\text{ET}_2\text{X}$ . est donc démontré que les conducteurs moléculaires sont des candidats pour la supraconductivité à haute température. Ces matériaux ont aussi été les prototypes pour la physique du gaz d'électrons à basse dimensionnalité (uni ou tridimensionnel). Ce caractère prototype a un rôle pédagogique vis-à-vis des conducteurs inorganiques. C'est le cas pour la compétition magnétisme - supraconduction existant aussi dans les cuprates à hautes  $T_c$  et très étudiée dans la famille des sels de Bechgaard ainsi que pour les problèmes d'ancrage des vortex dans les supraconducteurs 2D, problème essentiel pour l'obtention de forts courants critiques. L'enjeu pédagogique tout court des conducteurs organiques n'est pas à négliger. Leur fréquentation intellectuelle est très formatrice.

Ces matériaux ne doivent cependant pas être considérés sous le seul angle de la supraconductivité. Certaines propriétés (liées à l'unidimensionalité et au caractère organique) sont exploitables dans des applications : résonance paramagnétique étroite pour la magnétométrie, sensibilité aux rayonnements ionisants pour la dosimétrie et la microlithographie.

Dans le courant des années 70, d'autres conducteurs organiques se sont développés avec une forte pression du milieu industriel. Ce sont les polymères conducteurs dopés du type polyacétylène ou polypyrrole. L'enjeu technologique de ce type de conducteurs synthétiques est manifeste. Ils sont fabricables en couches minces sur de grandes surfaces. Leur conductivité peut atteindre celle du cuivre à la température ambiante. La déposition en phase vapeur suivie d'un dopage à l'iode est une méthode qui a permis d'obtenir des couches minces supraconductrices organiques à 4.2K. Si des dispositifs électroniques (Josephson) sont fabriqués, une voie possible passe par la microlithographie électronique sur des films minces de supraconducteurs organiques.

## L'étude mécanique du solide, génie des matériaux

Le solide au sens de ce rapport intéresse les mécaniciens en tant que matériau avec ses propriétés, principalement mécaniques, mais aussi physiques, chimiques et dimensionnelles. Les études cherchent à mesurer, expliquer et modéliser ces propriétés et leurs évolutions en relation avec la microstructure.

Les propriétés mécaniques sont étudiées dans le cas de sollicitations de plus en plus complexes : cycliques, programmées, aléatoires, multiaxiales et pour des environnements de plus en plus variés. Des moyens d'essais de plus en plus sophistiqués sont nécessaires. La modélisation pour sa part cherche à prédire le comportement de matériaux dans des conditions où l'expérimentation s'avère impossible, pour des raisons de taille ou d'environnement.

La dilatation, les propriétés de frottement et les propriétés thermiques (absorption, conduction) sont les principales propriétés physiques étudiées.

La corrosion, l'adsorption, la réactivité des surfaces, les réactions entre couches, l'accrochage des dépôts sont autant de phénomènes chimiques considérés en génie des matériaux.

Les propriétés dimensionnelles interviennent dans les alliages à mémoire de forme (AMF) ou dans les alliages résistants à haute température (superaliages) et dans le cas du fluage ou de la relaxation. La réversibilité et la tenue de l'éducation dans le temps des *AMF* sont particulièrement étudiées.

Les solides qui intéressent les mécaniciens peuvent être classés en trois grandes familles ; les métaux, les polymères, les céramiques. Les mélanges et les cas limites existent aussi et présentent souvent un grand intérêt.

Pour ce qui est des métaux, de nombreuses études portent sur les alliages légers d'Al, de Mg et de Ti, ainsi que sur les composites à matrice métallique (CMM) particuliers ou fibreux. La matrice est constituée par un alliage léger, le renfort par des céramiques ou des fibres de carbone. Le but est d'allier la légèreté avec des propriétés optimisées de résistance dans une direction ou de raideur. Les lois de comportement sont encore mal connues ainsi que les mécanismes de transfert de charges entre la matrice et le renfort. D'autres études, souvent stratégiques, touchent les alliages réfractaires et superalliages; elles cherchent à étendre vers les plus hautes températures l'utilisation d'alliages métalliques. Le domaine des traitements de surface est très actif; les études font intervenir principalement la caractérisation des interfaces et la tribologie avec la notion de débris et de phases nanocristallines.

Pour ce qui concerne les polymères et les solides amorphes, de nombreux travaux portent sur des systèmes complexes : cristaux liquides, quasi cristaux, solides semi cristallins, nanocristaux. L'aspect structural est particulièrement délicat et fait intervenir la notion de co opérativité pour la compréhension des propriétés.

Quant aux céramiques, la zircone est toujours à l'ordre du jour, l'adjonction d'oligo-éléments permettant de stabiliser de nouvelles phases.

Enfin un thème de recherche longtemps délaissé en dépit de son importance industrielle concerne les réactions d'hydrolyse mises en jeu dans les ciments.

Les matériaux testés proviennent généralement de partenaires industriels. Le chercheur ne maîtrise ni la précision, ni la reproductibilité de l'élaboration. Il lui est par exemple impossible de faire varier le paramètre concentration en tel ou tel élément. La maîtrise de l'élaboration est une condition indispensable d'une étude fiable et complète. Elle passe par la possibilité d'élaborer quelques kilogrammes de matière. Certains proposent la création d'un centre d'élaboration à l'échelle du CNRS avec un temps de réponse rapide pour satisfaire à la demande de nombreux chercheurs qui ne peuvent pas développer certaines études faute de matériaux.

## **LA POSITION DU CNRS DANS L'ENVIRONNEMENT FRANÇAIS ET INTERNATIONAL**

### **LE CNRS ET L'EFFORT FRANÇAIS DE RECHERCHE EN PHYSIQUE ET CHIMIE DU SOLIDE**

Le développement d'une nouvelle chimie de synthèse minérale et les études physiques des solides associés ont été assurés dans un passé récent conjointement par les laboratoires du CNRS et des autres grands organismes de recherche (CEA, CNET, ONERA, ...), les laboratoires universitaires et des



laboratoires industriels. On constate aujourd'hui une réduction de l'effort de la part de ces derniers partenaires. Ce fait est inquiétant en raison des enjeux économiques et du poids de la recherche dans la formation des meilleurs ingénieurs dans le domaine des matériaux. Cette évolution aura des effets à très long terme étant donné les délais considérables (10 à 15 ans) nécessaires pour maîtriser la mise sur le marché d'un matériau nouveau. Il convient d'avoir présent à l'esprit que dans le domaine des matériaux, s'il suffit de quelques semaines ou mois pour éteindre une action de recherche en cours, en créer une nouvelle ou en réactiver une temporairement arrêtée exige de longs et coûteux efforts. De manière générale, les liens avec le monde industriel sont insuffisants et les cloisonnements interdisciplinaires durables.

Analysons le point particulier des conducteurs moléculaires pour illustrer la situation française. La recherche française a été de haut niveau en ce qui concerne la composante physique (expérience et théorie). En chimie, certains laboratoires ont beaucoup contribué aux travaux antérieurs à la découverte de la supraconduction. S'ils n'ont pu réussir ce que le groupe danois a réussi, c'est probablement à mettre sur le compte du cloisonnement existant encore en France entre la chimie organique et la physique du solide. Les chimistes sont intéressés par la synthèse des molécules et la fabrication de matériaux, mais plus rarement par leurs propriétés. Le CNRS a joué un rôle essentiel dans la mesure où il a permis une recherche de longue haleine dans un domaine multidisciplinaire où le hasard seul ne permettait pas d'aboutir au résultat espéré. Il faut aussi souligner le rôle qu'a joué le PIRMAT en lançant des actions incitatives (RCP et ATP) et en contribuant aux séjours en France de spécialistes étrangers.

## LA FRANCE ET LA SITUATION AU PLAN INTERNATIONAL

La France possède une position respectable au plan international dans le domaine de la recherche en physique et chimie du solide. Cette position est cependant fragile en raison de la très active compétition mondiale. Illustrons ce point par quelques exemples.

Lorsque l'on parle chimie et physique du solide en France, on pense généralement à la chimie minérale à cause de la découverte de nombreux matériaux supraconducteurs : les cuprates à hautes  $T_c$ , les phases de "Chevrel", les dichalcogénures de métaux de transition, les supraconducteurs à structure  $A_{15}$ . Les liens entre la communauté de la chimie organique et celle de la physique des solides sont beaucoup plus récents. Ils se sont largement développés avec l'avènement *des* "métaux synthétiques" au début des années 70. Les résultats de cette coopération ont été obtenus assez rapidement, mais la collaboration entre les deux disciplines demeure encore assez faible et fragile en France lorsqu'elle est comparée avec le Japon,

Dans le domaine des conducteurs moléculaires, la recherche européenne (avec la forte composante française) a pesé lourd au niveau mondial. Toutefois on peut en 1992 être inquiet pour l'avenir. Les nouveaux matériaux sont découverts désormais au Japon et non en Europe. Les Français demeurent respectables (pour combien de temps encore ?) dans la physique des conducteurs moléculaires, mais la concertation entre chimie et physique a été plus étroite dans le passé. Cette concertation entre les deux disciplines concerne les départements scientifiques du CNRS qui pourraient inciter à une coopération plus étroite dans le cadre de RCP ou de GDR.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

### 1 - ACTIONS DE RECHERCHE À PRIVILÉGIER

De manière générale, si la chimie du solide doit se préoccuper d'affiner ses produits pour créer des matériaux performants, elle doit aussi, dans sa vocation fondamentale, créer des composés aux formulations et structures nouvelles présentant de nouvelles phases. Pour ce faire, elle doit rénover et intensifier ses programmes vers la synthèse solide-solide, via les précurseurs en solutions, moléculaires ou organo-métalliques, les méthodes sol-gel, la chimie douce... Elle doit remettre son processus d'analyse de base en place qui consiste avant toute étude approfondie des propriétés chimiques ou physiques, à préciser la structure atomique fine des produits créés. Elle doit porter une attention toute particulière à la cristallographie génératrice d'idées nouvelles, pour imaginer des architectures atomiques originales. Ces travaux structuraux doivent se doubler d'un effort intense vers des modélisations scientifiquement guidées. Ces buts font apparaître la nécessaire collaboration entre chimistes et physiciens du solide.

Abordons maintenant certains aspects plus spécifiques.

- Est à privilégier tout ce qui peut conduire à une meilleure compréhension de la liaison chimique : le terme générique de liaison ionocovalente masque le manque de définition quantitative de la liaison non métallique. Des progrès récents faisant la partition de la densité d'états en contributions dues à chaque orbitale permettent d'espérer une amélioration de cette définition et donc une confrontation avec les mesures (densités de charges, gradient de champ électrique, distributions électroniques déduites des spectroscopies...).

- Sont également à soutenir les recherches menées dans le domaine de la prévision des mobilités électronique et ionique dans le solide. Pour cela, il faudra disposer de séries de matériaux homologues aussi bien caractérisés que possible (structure, défauts cationique et anionique, transitions structurales...) afin que puissent être proposés des modèles mettant en avant les paramètres sensibles sur lesquels le chimiste pourra jouer. Dans le cas de la mobilité ionique, les interactions entre espèces mobiles dans des systèmes concentrés sont encore insuffisamment comprises malgré les progrès réalisés en simulation sur ordinateur.

- Un effort est à engager pour accroître notre connaissance des surfaces et des interfaces : leur étude reste toujours très en retard par rapport à celle du volume. Les problèmes sont conceptuels et expérimentaux. Les surfaces permettent de construire des systèmes bidimensionnels par adsorption contrôlée de matière qui obéissent à une physique nouvelle dont une des manifestations les plus tangibles est l'apparition de phases originales. Les solides divisés ou poreux pour lesquels la fraction de matière appartenant aux surfaces devient comparable à celle du volume révèlent des propriétés nouvelles, en particulier catalytiques. De grands progrès ont été faits dans l'étude structurale microscopique des agrégats moléculaires qui sont les constituants élémentaires des solides divisés. La physicochimie des systèmes artificiels de dimensionnalité inférieure à deux est en plein développement dans le domaine des semiconducteurs avec les nanostructures, les superréseaux, les filtres et boîtes quantiques, dans le domaine des systèmes métal-métal, métal-semiconducteur ou diélectrique diélectrique, en particulier avec les multicouches à propriétés magnétiques et dans le domaine de la catalyse en termes d'activité et de sélectivité.

Un effort est également à entreprendre en vue d'une meilleure compréhension des techniques d'assemblage qui permettront de préparer des matériaux composites. L'évolution actuelle tend à la compréhension du milieu en relation avec sa structure locale réelle, en tenant compte de sa complexité et en dépassant sa modélisation

sous la forme d'un milieu homogène. Un point en forte croissance nécessaire est donc la simulation : celle-ci permet de rationaliser certaines approximations dans les modèles théoriques. Si elle n'est pas de développement récent, la simulation apparaît maintenant comme une troisième voie entre l'expérience et la théorie. Les méthodes de Monte-Carlo et de dynamique moléculaire se sont avérées particulièrement riches pour la simulation des structures, l'étude des transitions de phases à l'équilibre, le calculs de diagramme de phase. Des progrès sont attendus dans les systèmes hors équilibre.

Tout porte à penser que la simulation numérique va connaître une forte croissance dans les années à venir, amplifiée par l'augmentation et la puissance de calcul installée dans les laboratoires et l'accès aux ordinateurs vectoriels. L'objectif devra être d'aller vers une conception assistée par ordinateur des molécules et des matériaux. Cette ingénierie de la molécule ou des matériaux ne pourra se développer sans d'importantes banques de données et un gros effort de programmation.

La physico-chimie des solides géologiques, en liaison avec les matériaux sous conditions extrêmes, a été mentionnée comme étant en rapide croissance. Parmi les thèmes encore peu explorés et qui connaîtront probablement un développement important, on peut citer : a) structure et propriétés des solides mal organisés (verres, gels) et des solides finement divisés (argiles) qui constituent un point de rencontre avec les sciences biologiques par l'intermédiaire de la pédologie; b) interfaces et surfaces des matériaux terrestres, par exemple, l'interface métal-oxyde; c) matériaux hors équilibre (de nombreux minéraux sont métastables) avec quantification de leur degré de déséquilibre et entre autre application potentielle, une meilleure compréhension des propriétés des solides intervenant dans la composition des ciments et bétons. d) propriétés des solides, sous très hautes températures et pressions statiques ou dynamiques (ondes de choc). Des phénomènes nouveaux tels que l'amorphisation et la préfusion sous pression commencent seulement à être étudiés.

Il est clair que le transfert d'informations entre l'importante communauté des physicochimistes du solide et les quelques groupes de physico-chimie des minéraux doit être accéléré grâce à plus de travaux en collaboration et de réunions communes. Il faut également développer la formation des jeunes chercheurs des sciences de la Terre par l'organisation d'écoles permettant l'acquisition des connaissances de base nécessaires à l'application et au développement des outils de la physico-chimie.

## 2 - EVOLUTIONS STRUCTURELLES ET FONCTIONNELLES À POURSUIVRE ET À ENGAGER

### **Le développement des "Grands Equipements"**

Les grands équipements dont ont besoin les sciences du solide sont essentiellement des sources de champs magnétiques intenses (SNCI Grenoble, SCI Toulouse) et des sources puissantes de photons, de l'infrarouge aux rayons X, comme au LURE et très prochainement à l'ESRF, de neutrons, comme à l'ILL ou à Léon Brillouin ou d'ions lourds dans les divers accélérateurs. Mieux comprendre la matière, c'est aller de plus en plus vers la connaissance du microscopique donc vers celle de l'ordre local. À l'exception des observations en microscopie électronique à haute résolution ou par effet tunnel qui peuvent être réalisées en laboratoire, les autres études demandent des intensités de faisceau importantes pour améliorer la résolution temporelle, réduire les dommages induits par irradiation et améliorer les rapports signal/bruit et la résolution; elles ne peuvent être que du ressort des "Grands Equipements". L'irruption de ces instruments dans la vie scientifique requiert une tâche de formation spécifique des jeunes chercheurs. Cette formation, préalable à la constitution d'une communauté internationale d'utilisateurs imposée par la nature même de ces



équipements, doit avoir une dimension européenne. Le programme Hercules récemment mis en place à Grenoble en est un exemple.

## La pluridisciplinarité

Les progrès des connaissances fondamentales et l'essor des grands programmes, civils et militaires, ont fait lentement émerger une prise de conscience du matériau considéré comme un ensemble requérant la coopération des diverses disciplines. Mais, la pluridisciplinarité joue-t-elle à plein ? N'aurions-nous pas manqué de grands rendez-vous ? La découverte des supraconducteurs à température critique élevée n'a-t-elle pas mis en évidence que la concertation, si elle existait, n'en était pas pour autant assez efficace. Ces nouveaux matériaux élaborés en France, de structures compliquées certes, avaient laissé indifférents les physiciens qui, peut-être, avaient une certaine appréhension à étudier de tels matériaux. Pourtant la supraconductivité ne manquait pas de spécialistes, mais il n'y a pas eu "percolation" des idées. Pour des chercheurs habitués à ce que des supraconducteurs soient plutôt des métaux, il était difficile de penser que des oxydes, traditionnellement isolants ou semiconducteurs, puissent devenir supraconducteurs au-dessus de la température de l'azote liquide.

Sans faire le procès de quiconque, peut-être le chimiste se satisfait-il mal d'être considéré comme un simple fournisseur d'échantillons pour un physicien qui ne réalise pas toujours la somme de créativité que demandent la synthèse et **l'élaboration** de nouveaux matériaux. Pour comprendre le comportement des uns et des autres, il faut peut-être admettre que théoriciens et expérimentateurs, qu'ils soient chimistes ou physiciens, n'échangent pas assez leur représentation de la réalité.

Il convient donc de favoriser l'émergence et le développement de laboratoires à vocation pluridisciplinaire réunissant en étroite collaboration, par exemple en électronique et optoélectronique,

chimistes et physiciens du solide, physiciens et technologues des composants, électroniciens. C'est là un moyen de maintenir la France à une bonne place dans la compétition internationale sur les thèmes qu'elle a retenus en dépit de la disproportion des moyens mis en œuvre dans les grands groupes industriels du Japon et des Etats-Unis.

En ce qui concerne le CNRS en général, il paraît essentiel que l'effort de cohérence et de synergie entre les différentes équipes soit systématiquement entretenu et soutenu. C'est en particulier le cas des initiatives régionales à vocation structurante déjà initiées dans le cadre de pôles régionaux donc la dotation en moyens humains et matériels doit leur permettre d'acquérir ou de conserver un niveau comparable à celui des autres centres de recherche européens. Il ne nous semble pas indispensable de vouloir rassembler toutes ces compétences en un lieu unique. Au contraire une coopération étroite entre les laboratoires les plus qualifiés chacun dans leur spécialité dans le cadre d'une convention de travail fonctionnant sur le modèle des actions de la Communauté Européenne pourrait être un modèle efficace.

Un problème qui est souvent évoqué est celui de la reconnaissance des résultats scientifiques par le Comité National du CNRS. Ces activités pluridisciplinaires seraient peut-être mieux considérées et valorisées par l'existence d'un plus grand nombre de commissions interdépartementales ou au minimum la participation de membres (probablement nommés) représentant une activité particulière ne dépendant pas du département scientifique principal.

## 3 - LA NÉCESSITÉ DE LA FORMATION

L'évaluation d'une discipline doit toujours faire apparaître deux aspects que sont l'enseignement et la recherche et qui ne peuvent être dissociés pour progresser. La chimie du solide est une discipline encore jeune, née en France et qui en est encore à trouver une définition académique. La chimie du

solide, on en parle beaucoup, elle fait l'objet de nombreuses réunions internationales, mais l'enseigne-t-on vraiment ? En France, sans doute, puisqu'il y a une véritable école de pensée dans toutes les grandes Universités. Dans d'autres pays, sa diffusion est moins nette, que ce soit aux Etats-Unis, au Japon, dans les pays de la CEE ou même en Europe de l'Ouest. Une analyse internationale, dès 1985, reconnaissait la créativité des pays européens et notamment celle de la France dans le domaine des matériaux où les chercheurs ne se contentaient pas de publier seulement des méthodes de synthè-

se et des structures, mais faisaient apparaître une étude des propriétés qu'elles soient électriques, magnétiques, optiques... Il convient de poursuivre dans cet esprit la formation des jeunes chercheurs en étant attentifs à la transmission du savoir qui peut disparaître si l'on ne renouvelle pas à temps les chercheurs permanents par de jeunes recrues, qu'elles soient à l'Université ou au CNRS.

**Bernard Bigot**  
*Président du groupe 08*

# 09

## OPTIQUE ET ELECTRONIQUE

### LES ENJEUX

L'optique et l'électronique connaissent actuellement des mutations et une expansion spectaculaires. Peu d'autres domaines scientifiques sont confrontés à des changements aussi rapides et aussi profonds. Leur dynamique est tirée par des enjeux économiques considérables. Ce sont en effet des disciplines dont la diffusion s'est généralisée dans l'ensemble des technologies, allant des plus avancées, civiles ou militaires, au domaine grand public. On peut citer les lecteurs de disques compacts, la vidéo, les matériels informatiques et leurs périphériques, ... Les marchés évoluent extrêmement rapidement, avec l'apparition incessante de nouveaux produits plus performants. Le marché mondial de l'électronique croît de 10 % par an. Il en résulte une compétition effrénée entre les industriels de tous les pays, avec, en électronique en particulier, des risques de situation hégémonique. De plus, les bouleversements géopolitiques en cours auront des conséquences sur les stratégies de développement de nombreuses entreprises. On peut attendre, dans les prochaines années, de profondes restructurations dans ce secteur d'activité qui impliqueront des révisions importantes des politiques de recherche.

De plus en plus, l'optique et l'électronique apparaissent intimement liées dans le développement de nombreux systèmes. La prolifération des termes

génériques en est la preuve : optronique, opto-électronique, photonique, magnéto-optique, etc. Par l'association de solutions mixtes optiques - électroniques, dont les apports sont complémentaires, on voit apparaître des appareillages ayant des performances que ni l'optique, ni l'électronique ne pourraient atteindre seules.

Si les enjeux économiques sont énormes et tirent nécessairement les recherches dans ces disciplines, on peut souligner que les percées enregistrées sont intimement liées à l'avancée des connaissances. La recherche elle-même a ses exigences de développement de techniques poussées à leur limites. Elle bénéficie des progrès technologiques et s'en nourrit pour ensuite proposer de nouveaux concepts et de nouveaux développements qui seront fondamentaux à l'avenir. Le développement récent des hétérostructures semiconductrices mettant en jeu des effets quantiques, utilisées d'ores et déjà dans des mémoires électroniques rapides, dans les diodes lasers, ou dans d'autres composants optoélectroniques, en est une illustration.



## L'EVOLUTION ET LES TENDANCES

Si Ton compare la situation actuelle à celle qui existait il y a dix ans en optique et en électronique, l'évolution des connaissances et des techniques, comme celle des produits apparus sur le marché, est impressionnante. Les progrès ont révolutionné les domaines audio et vidéo, la micro-informatique s'est transformée, on entre dans l'ère de la télévision haute définition et du radiotéléphone. Les systèmes de traitement d'images, de commande automatique, de transmission et de stockage de l'information, de détection et de sécurité ont vu les évolutions de leur complexité et leurs performances amplifiées et accélérées par celles des composants et circuits électroniques et optoélectroniques. Au niveau de la recherche, de nouveaux cristaux pour lasers ont vu le jour, le traitement optique de l'information s'est imposé comme thème de recherche, on voit apparaître des notions fondamentales comme la réduction du bruit optique. En électronique, les technologies ont progressé de façon extraordinaire. Des transistors de longueur de grille nanométrique ont été réalisés, de nouveaux effets physiques comme l'effet tunnel résonnant sont mis à profit pour la conception de composants innovatifs, et ce ne sont là que quelques exemples.

Le nombre sans cesse plus grand d'informations à traiter et la nécessité de les traiter de plus en plus vite est un moteur essentiel du développement de ces disciplines. De plus en plus, l'optique et l'électronique sont associées dans ce but, de façon à mettre à profit leurs avantages respectifs et leur complémentarité. Même si ce sont des domaines porteurs pour les applications militaires, leur développement est surtout tiré par la nécessité d'une instrumentation sans cesse plus performante, quel que soit le secteur d'application, que ce soit pour le grand public (audiovisuel, médical, ...), ou pour de grands projets scientifiques comme en astronomie ou en physique des particules.

Les évolutions, aussi bien en optique qu'en électronique et en optoélectronique, sont basées sur les progrès qui ont pu être réalisés en parallèle dans l'élaboration et la mise en forme des matériaux. Les techniques d'épitaxie permettent de faire croître des couches cristallines en contrôlant le processus au niveau de la monocouche atomique et en alternant des matériaux différents pour former des structures artificielles adaptées à chaque étude, structures à puits quantiques ou super-réseaux par exemple, dont les applications sont multiples. Les traitements de surface, dépôts de couches minces ou gravure, ont également beaucoup progressé et ouvert de nombreuses possibilités, en particulier avec le développement des technologies assistées par plasmas ou par faisceaux, d'ions. La définition de motifs de plus en plus fins est devenue possible avec le développement de la lithographie optique, électronique ou par rayons X. Le développement de nouveaux matériaux comme les matériaux moléculaires, ou le dopage de fibres optiques par des ions terres rares laissent entrevoir de nouvelles applications. Ce sont des efforts conjoints et simultanés entre les études sur les matériaux (cristallogénèse, chimie des matériaux, propriétés optiques et électroniques), le développement des technologies, la conception et la réalisation de dispositifs, qui permettent de rester à un niveau compétitif dans ces domaines où les changements sont extrêmement rapides.

### 1 - OPTIQUE

Parmi les grandes disciplines traditionnelles de la physique, la science de la lumière est l'une de celles dont le champ d'application est le plus difficile à délimiter ; s'il est clair que les recherches sur la lumière, en tant qu'objet d'étude, relèvent de l'optique, bon nombre de méthodes utilisant la lumière comme outil glissent en peu d'années des laboratoires d'optique vers les laboratoires d'autres disciplines (chimie, physique du solide, astronomie, ...) et aussi, très rapidement, vers diverses applications et l'ingénierie.

Du point de vue technique, le développement et l'extension constante des recherches en optique sont largement conditionnés par les progrès remarquables des matériaux et des sources disponibles, aussi bien en termes d'accordabilité, de puissance, que d'économie ou de facilité d'emploi.

D'un point de vue plus général, l'optique peut être considérée comme la science des rayonnements électromagnétiques de cohérence finie, et de leurs interactions avec la matière. Les notions mêmes de "cohérence" ou de "nombre de photons par modes", font l'objet de débats animés entre opticiens "quantiques" ou "non-linéaristes".

Dans de nombreuses applications, l'optique est très souvent associée à d'autres techniques (micro-mécanique, acoustique, électronique). L'instrumentation optique, les télécommunications et le traitement optique du signal, ont connu des progrès importants au cours des dernières années.

## Sources lasers et détecteurs

L'évolution, récente la plus remarquable, au confluent de la physique des lasers et de la science des matériaux, a sans doute été la généralisation, dans les laboratoires, des lasers à solide : ainsi, les anciens lasers à colorant sont en passe d'être supplantés par des lasers saphir-titane, à la fois plus fiables, plus puissants, accordables dans un plus large domaine autour du proche infrarouge, capables d'un fonctionnement continu ou impulsionnel, éventuellement femtoseconde, et plus simples et faciles d'emploi; de même, on voit apparaître sur le marché des lasers YAG pompés par diodes, peu encombrants mais puissants et très purs spectralement, qui rendent possible l'exportation de méthodes optiques très performantes des laboratoires vers l'industrie. Par ailleurs, les performances des lasers à semi-conducteur (diodes laser) progressent constamment, que ce soit pour la puissance, la pureté spectrale, la faible durée d'impulsions, l'accordabilité ou les longueurs d'onde d'émission accessibles. On reviendra sur ce point dans le sous-chapitre sur les télécommunications optiques.

La gamme de fréquences accessibles par les sources laser existantes s'étend continuellement. Si les spectres visible et proche infrarouge sont depuis longtemps pratiquement entièrement couverts, un effort important est fait en direction de l'infrarouge moyen (2 à 10  $\mu\text{m}$ ), qui devient accessible, en particulier par des techniques de différence de fréquence dans des mélangeurs non-linéaires; de même, on arrive désormais à raccorder presque continûment le domaine visible à l'infrarouge lointain (200  $\mu\text{m}$ ) des lasers moléculaires. A l'autre bout du spectre, les lasers à excimères étendent la gamme accessible jusqu'à 150 nm. Les sources incohérentes VUV connaissent un regain d'intérêt grâce aux progrès accomplis dans les techniques de décharge. Notons l'avancée sur le laser X avec l'obtention d'une émission saturée de forte brillance à 23,6 nm. D'autre part, le rayonnement synchrotron, de par son étendue spectrale et son accordabilité dans le domaine X moyen, reste un outil remarquable pour la recherche fondamentale comme pour la recherche appliquée, même s'il requiert une infrastructure lourde, ce qui est exceptionnel en optique.

Par ailleurs, les lasers femtosecondes sont maintenant largement répandus dans les laboratoires et ont ouvert de nouveaux domaines de recherche, notamment en spectroscopie ultrarapide. La durée des impulsions couramment réalisées est inférieure à 100 fs, mais des techniques récentes d'auto-blocage de mode, ou de compression par dispersion d'impulsions spectralement élargies permettent d'atteindre des durées de l'ordre de quelques femtosecondes seulement, avec des puissances crête pouvant atteindre  $10^{14}$  W.

La course à la puissance revêt une importance particulière dans le domaine des interactions laser/plasma. Ces recherches sont toujours principalement tendues vers la fusion inertielle, mais ont dernièrement débouché sur d'autres applications potentielles, comme l'accélération de particules par battement d'ondes, ou l'obtention de sources laser X durs (23 nm). Dans un contexte plus industriel, les efforts en vue d'améliorer la puissance visent principalement la fiabilisation des lasers CO<sub>2</sub>.

(jusqu'à 25 kW en continu) et le développement de nouvelles sources de puissance à plus courtes longueurs d'onde (Néodyme-verre, excimères).

Enfin, il convient de relever les progrès récents en matière de *photodétection*, interface primordiale entre l'optique et l'électronique. La réalisation de matrices de détecteurs, le rapprochement de l'électronique et de la zone photosensible constituent des évolutions indispensables. A côté des photodiodes et des phototransistors, plus spécifiques des applications aux télécommunications, des progrès importants ont été obtenus dans la miniaturisation de détecteurs de type photomultiplicateurs en associant une photocathode classique, suivie d'un champ d'accélération des électrons sur une très courte distance, à une photodiode en silicium. En remplaçant la diode par une matrice de pixels, on obtiendra un détecteur à localisation de photons sensible à un photoélectron avec une précision de localisation de quelques microns. Dans le domaine infra-rouge, de nouveaux détecteurs performants sont étudiés, basés entre autres sur des structures à puits quantiques asymétriques.

## Interactions matière - rayonnement

### Optique non-linéaire

L'optique non-linéaire se situe à la croisée de deux approches, très fructueuses ces dernières années, de la physique des interactions matière/rayonnement :

- On peut, d'une part, raisonner en termes de réponse non-linéaire locale et instantanée d'un milieu matériel à la propagation d'une onde optique : l'action de la lumière sur elle-même mène alors à une très grande variété d'effets, dont l'utilisation astucieuse permet une infinité d'applications, notamment pour le traitement du signal.

- L'autre tradition, héritée de la physique des plasmas, étudie en détail un petit nombre d'équations différentielles non-linéaires très générales dont

la richesse permet de décrire aussi bien des situations "solitoniques" ultrastables que la dynamique de défauts ou les routes vers le chaos dans les lasers qui sont ainsi devenus un champ d'expérimentation privilégié pour les physiciens du non-linéaire et des instabilités.

Toutefois, le développement de l'optique non-linéaire "extrême" met en évidence les limites communes de ces deux approches : comment décrire une impulsion femtoseconde contenant à peine quelques oscillations du champ ? Comment un mécanisme d'amplification cohérente (émission stimulée) peut-il encore décrire des situations où le nombre de photons par mode devient très petit devant 1 ? De même, l'étude des diffusions résonnantes devient délicate dès lors que l'évolution des champs devient plus rapide qu'une vibration moléculaire.

On peut également noter que, outre leur intérêt technologique propre, fibres et guides d'ondes optiques constituent un outil de choix pour l'étude des interactions non-linéaires, du fait des grandes longueurs d'interactions et des fortes densités de puissance qu'ils autorisent.

### Optique quantique

Fait remarquable, la lumière reste encore aujourd'hui un objet d'étude fondamental, et un terrain idéal pour tester la Mécanique Quantique dans ses aspects les plus subtils.

Les recherches récentes en optique quantique ont eu pour principal objet la réduction du bruit quantique. Les mesures d'intensité lumineuse sont en effet limitées par les fluctuations quantiques du champ électromagnétique, le bruit de photon (ou bruit de grenaille) ayant longtemps été considéré comme une limite infranchissable. Plusieurs dispositifs ont été proposés pour s'en affranchir : génération non-linéaire de lumière produisant des états comprimés du champ électromagnétique (le bruit de photons étant réduit sur une des composantes du champ et amplifié sur la composante en quadrature), production de faisceaux jumeaux (le bruit



de photons étant identique sur les deux faisceaux). Les retombées de ce type de recherches peuvent être importantes pour les mesures de grande précision (détection des ondes gravitationnelles) ou pour le traitement optique du signal.

Notons également les mesures quantiques non destructives (QND), qui démontrent la possibilité de mesurer une grandeur en la perturbant plus faiblement que ce que l'on croyait être la limite incontournable.

Enfin, on peut citer les recherches en vue de frustrer l'émission spontanée d'atomes fortement excités en les plaçant dans des cavités de taille comparable à la longueur d'onde des photons concernés.

### Optique atomique

Il est désormais possible de refroidir et de piéger des atomes neutres dans un faisceau laser. Les dispositifs expérimentaux sont de plus en plus élaborés : on est d'abord passé du simple ralentissement d'un jet atomique (obtention de vitesses de l'ordre de quelques m/s) aux mélasses optiques dans lesquelles les atomes sont soumis à une viscosité due à la lumière, avec des températures expérimentales de l'ordre de quelques  $\mu\text{K}$ . La température cinétique la plus basse jamais atteinte ( $2\mu\text{K}$ ) a été obtenue en France avec des atomes de césium. L'étape suivante est le piège magnéto-optique, d'abord placé à l'extrémité d'un jet atomique, puis, plus simplement, dans une cellule : les atomes sont alors piégés dans un vrai puits de potentiel ce qui permet d'avoir des densités plus importantes ( $10^{12}$  atomes/cm<sup>3</sup>).

Le domaine du refroidissement par laser est entré, ces dernières années, dans une phase d'exploitation. Plusieurs domaines d'application sont abordés : métrologie et mesures de très haute précision (la transition d'horloge de l'atome de césium a récemment été observée avec une largeur de 2 Hz en utilisant une fontaine atomique à atomes froids), études d'optique non-linéaire, manipulation de jets atomiques, interférométrie atomique, cavité à

atomes. Des interférences entre ondes de matière atomique ont déjà été observées et, théoriquement, des interféromètres atomiques devraient avoir une sensibilité très supérieure ( $\approx 10^{10}$ ) à celle des dispositifs optiques (réalisation de gyromètres et d'accéléromètres). Ces thèmes sont actuellement, en pleine expansion et les équipes françaises y jouent un rôle de premier plan, tant expérimentalement que du point de vue des concepts.

## Télécommunications et traitement optique du signal

La recherche dans le domaine des *télécommunications optiques* s'est récemment élargie, depuis l'optimisation des sources et des matériaux jusqu'à la compréhension des mécanismes physiques d'interaction lumière/matière, que ce soit dans les Fibres ou dans les matériaux non-linéaires, et le développement de composants intégrés performants.

L'ambition des prochaines générations de systèmes à Fibres est d'exploiter pleinement leur bande passante potentielle (100 GHz); plusieurs thèmes font donc l'objet d'une recherche très active :

- des lasers et des amplificateurs à Fibres dopées terres rares (Erbium, Néodyme), pompés optiquement, autorisent des gains supérieurs à 30 dB ce qui présage d'une révolution des télécommunications à grande distance. Ce domaine de recherche est exemplaire pour la rapidité avec laquelle se fait le transfert des résultats du laboratoire vers les applications sur le terrain;

- associée à de tels amplificateurs, l'exploitation astucieuse de l'effet Kerr pour compenser les effets de la dispersion permet d'assurer la propagation de solitons sans déformation ni élargissement significatifs sur des milliers de kilomètres. La maîtrise de la dynamique des interactions non-linéaires (Kerr, Brillouin, Raman) permet d'en élever les seuils d'apparition, mais aussi d'envisager des fonctions optiques nouvelles (multistabilité, modulation, filtrage, génération et transport de fréquences nouvelles, etc.);

- le multiplexage fréquentiel à haute densité d'un grand nombre de canaux appelle encore des efforts importants vers la réalisation de composants intégrés (filtres, diodes picosecondes accordables, modulateurs); par ailleurs, les réseaux locaux à fibres optiques (TVHD) requièrent des composants spécifiques (fibres à haut seuil Brillouin, modulateurs de cohérence, ...),

Les sources privilégiées pour les télécommunications optiques sont les *diodes laser*, qui ont vu leur gamme spectrale d'émission s'accroître de chaque côté du spectre. Vers TIR les longueurs d'onde de 2 à 4  $\mu\text{m}$  sont explorées, avec des structures basées sur des antimoniures, pour les transmissions dans des fibres à faible atténuation (verres fluorés). Vers le visible, pour bénéficier d'une meilleure résolution spatiale, de gros efforts sont faits pour réaliser des lasers bleus et la technologie des semiconducteurs II-VI a récemment franchi un saut prometteur. De même, les fréquences de modulation ont considérablement augmenté et en blocage de modes, des impulsions aussi courtes que 200 fs ont été obtenues avec des diodes laser GaAs/GaAlAs. Par ailleurs, la nécessité de sources de faible largeur de raie et accordables en longueur d'onde pour la détection hétérodyne a conduit à la réalisation de structures sophistiquées (lasers multisections). Enfin, l'augmentation de puissance peut être obtenue par une émission de surface à l'aide de miroirs intégrés ou d'un couplage par réseaux diffractants du second ordre. Une autre technique intéressante consiste à utiliser un réseau de diodes incohérentes qui pompent un milieu amplificateur en cavité externe.

Signalons enfin que les structures quantiques de faible dimensionalité (fils ou boîtes quantiques) pourraient présenter des performances remarquables quand les difficultés de réalisation seront surmontées.

Les efforts portent également sur la réalisation de modulateurs ou de composants non-linéaires de traitement de signal optique et sur la réalisation de *circuits optiques intégrés*. Différents substrats sont utilisés : le verre, des cristaux hautement non-li-

néaires ( $\text{LiNbO}_3$ ) ou des semiconducteurs, essentiellement les composés III-V ce qui permet la réalisation de composants opto-électroniques intégrés. Cette évolution a de nombreuses répercussions dans d'autres domaines, comme celui des capteurs ou de la métrologie où Ton voit maintenant apparaître des systèmes intégrés sur un substrat unique rassemblant des fonctions de déphasage, de commutation ou encore de conversion de fréquence. L'intégration de la source progresse avec la réalisation de microlasers intégrés. Le développement d'éléments logiques optiques tend vers la réalisation de matrices de composants. Au niveau du détecteur, l'intégration du photodétecteur avec son préamplificateur est l'une des solutions proposées pour diminuer les temps de réponse.

Un autre aspect de cette évolution concerne les systèmes de *traitement optique du signal*. On connaît les besoins de plus en plus importants en matière de calculs rapides en traitement d'images, en traitement radar, ... L'optique peut, dans certains cas, apporter une solution grâce au parallélisme intensif (spatial ou spectral) qu'elle autorise et à la facilité de réalisation d'interconnexions optiques avec un très faible niveau de diaphonie. L'introduction de l'optique dans des calculateurs électroniques devrait aboutir à des machines parallèles offrant des cadences de calcul de plusieurs milliards d'opérations par seconde. Plusieurs projets ont abouti à des démonstrateurs : réseaux d'automates cellulaires, génération optique de tableaux de nombres aléatoires, corrélateurs acousto-optiques, processeurs systoliques pour le calcul de produits matrice x vecteur. On retrouve dans la plupart des processeurs optiques actuels les technologies de la microoptoélectronique pour réaliser des matrices de composants bistables, ou de modulateurs ou encore de diodes laser indispensables pour assurer la transduction des données numériques sous forme optique.

Après s'être solidement implanté dans les applications grand public de l'électronique audio et vidéo, le *stockage optique* commence maintenant à être utilisé en informatique professionnelle et bureautique. Ses avantages sur le stockage magnétique sont la densité de stockage (et corrélativement

le temps d'accès) et l'absence de contact mécanique. Les systèmes actuels doivent évoluer vers une augmentation des densités de stockage (actuellement de l'ordre de  $100 \text{ Mbit/cm}^2$ ). A cet égard, des diodes laser émettant dans le bleu ou l'utilisation de sources intégrées à ces longueurs d'onde permettraient une augmentation d'un facteur 4 de la densité. Pour se généraliser, les disques optiques doivent être effaçables (ou réversibles). Plusieurs solutions (magnétooptiques ou à transition de phase) sont actuellement utilisées, et de nouveaux matériaux sont en cours d'étude.

Par ailleurs, des technologies de stockage reposant sur des mécanismes physiques très différents sont proposées, comme le stockage holographique dans un matériau photoréfractif aisément effaçable et réinscriptible, ou le multiplexage en fonction d'une autre propriété du matériau, comme la fréquence de résonance (mémoires à "*hole-burning*" par creusement de trous dans un spectre inhomogène).

## Instrumentation optique

L'optique intervient dans un très grand nombre d'instruments de mesure, parfois même sans que l'utilisateur en soit conscient. Plutôt que d'en dresser une liste forcément incomplète, on ne fera ici qu'un rapide tour d'horizon des progrès récents ou attendus, en laissant de côté les champs d'applications très spécialisés comme l'optique médicale et l'optique militaire. Nous ne ferons également que mentionner une nouvelle voie prometteuse de l'optique instrumentale de l'avenir : la micro-optique qui, utilisant les techniques de la microlithographie, permet de réaliser des composants ou d'ajuster des profils d'indice à l'échelle micrométrique.

### Métrologie

D'une manière générale, les efforts actuels en métrologie se tournent de plus en plus vers la quête d'un "étalon ultime" qui, grâce aux relations fondamentales de la physique, serait à la fois un étalon de masse, de longueur et de temps.

C'est dans le domaine des mesures de fréquences que les progrès les plus marquants ont été faits. Grâce à la finesse spectrale des lasers hautement stabilisés, il a été possible d'observer des raies optiques avec des résolutions extrêmement grandes ( $2 \cdot 10^{-13}$  pour une raie de l'ion  $\text{Hg}^+$  "piégé et refroidi"). Ces résultats permettent d'envisager à terme la réalisation de nouveaux *étalons de fréquence optiques* concurrentiels avec l'horloge à césium. Ces techniques ont permis d'aborder plusieurs thèmes d'intérêt très fondamental : tests de la relativité restreinte, recherche des ondes gravitationnelles (projet VIRGO) ou tests de l'électrodynamique quantique sur des systèmes simples. Cette amélioration de la précision des horloges est également recherchée pour de nombreuses applications technologiques : augmenter par exemple la précision de la localisation dans la navigation par satellite, ou permettre dans le domaine des télécommunications optiques un multiplexage à des fréquences de plus en plus élevées.

De nouvelles méthodes de mesure assurant des *résolutions nanométriques* ont été développées. La profilométrie hétérodyne à très haute résolution permet d'effectuer sans contact des relevés de profils de surface avec une résolution en profondeur de quelques nanomètres. De telles résolutions deviennent indispensables dès que l'on aborde par exemple la réalisation et la caractérisation de couches minces de haute qualité pour les optiques X. On retrouve cette tendance en *microscope à effet tunnel optique*. Celle-ci fait intervenir des ondes évanescentes à la surface d'un dioptre ou au voisinage de l'extrémité d'une fibre. L'exploitation des propriétés de ces ondes permet d'obtenir, en microscopie, des résolutions spatiales sub-longueur d'onde (quelques dizaines ou centaines de nanomètres). L'interprétation des images de nano-objets alors obtenues devient toutefois assez délicate, en dépit des progrès spectaculaires enregistrés dans le traitement de l'optique en champ proche.

Notons enfin que les capteurs optiques interviennent également dans nombre de matériaux "intelligents", et que des composants compétitifs à fibres, notamment les gyromètres, apparaissent sur le marché.



## Astronomie

Plusieurs développements récents méritent d'être mentionnés :

- L'interférométrie de tavelures, créée en France en 1974, permet de réduire l'effet des turbulences de l'atmosphère et d'augmenter la résolution des télescopes. Grâce aux techniques bispectrales on reconstitue maintenant des images complexes avec une résolution de 25 millisecondes d'arc. D'autres approches sont explorées : techniques différentielles ou par retournement de pupille. Le développement d'une assise théorique de l'ensemble de ces méthodes donne entre autres une mesure de la fiabilité des images obtenues.

- Grâce à *l'optique adaptative*, on atteint maintenant la résolution maximale du télescope en créant en temps réel sur un miroir souple des déformations inverses de celles causées par les turbulences de l'air. Cela nécessite une source ponctuelle dans le champ pour la mesure du front d'onde incident et l'idée du tir laser pour créer une étoile artificielle servant à la mesure du front d'onde, publiée en France en 1984, commence à être développée.

- Enfin de nombreuses études sont faites sur les *réseaux de télescopes*, qui doivent être positionnés avec une précision comparable à la longueur d'onde du rayonnement étudié, ce qui pose des problèmes technologiques ardu. Une part importante des recherches dans ce domaine est faite en France avec plusieurs projets nationaux opérationnels. Mentionnons également les projets d'interféromètres en orbite ou basés sur la lune, longtemps considérés comme du très long terme, mais dont certains se concrétisent.

## Spectroscopie

La spectroscopie reste un outil de choix pour les diagnostics les plus divers (astrophysique, et physique de l'atmosphère, plasmas, physique du solide, chimie, etc.); de nouvelles méthodes sont développées continuellement, mettant à profit les

récents progrès des sources laser notamment pour la résolution en temps ou en fréquence.

À l'échelle atomique, cette méthode classique d'analyse est mise à profit dans la détection de traces, la séparation isotopique ou pour des tests plus fondamentaux (par exemple l'étude des états très excités pour lesquels apparaît le chaos quantique). En phase gazeuse, elle est également d'une grande importance fondamentale et pratique pour l'étude du spectre des systèmes plus complexes que sont les molécules et agrégats (interface avec la chimie, les sciences de l'atmosphère, ...). Jets moléculaires et spectroscopie d'ionisation permettent une analyse fine des structures et vibrations des molécules et des complexes, ou celle du passage de l'atome au solide. La spectroscopie de la phase condensée est essentielle pour la caractérisation et l'étude *des* propriétés dynamiques et électroniques du solide, des solutions et des systèmes biologiques (interface avec la physique du solide, la chimie et la biologie). Citons également une nouvelle technique de spectroscopie de nano-échantillons capable de résoudre la contribution de molécules individuelles. En physique du solide, les techniques spectrales sont couramment utilisées dans les structures à puits quantiques et les systèmes confinés. Elles permettent l'étude des recombinaisons rapides des porteurs dans les semi-conducteurs et récemment celle des corrélations électroniques dans les structures à effet Hall quantique. Enfin, en biologie, la compréhension du fonctionnement des centres photosynthétiques profite de la combinaison des études structurales avec la spectroscopie temporelle.

## 2 - ELECTRONIQUE

### Les composants et dispositifs

L'évolution de l'électronique est très dépendante de celle des matériaux et des technologies microélectroniques. Ses grandes lignes découlent de trois types d'impératifs :

- intégrer un nombre de plus en plus grand d'éléments sur la même puce, donc les miniaturiser et complexifier les circuits;

- fonctionner à des fréquences de plus en plus hautes pour accroître le débit d'information;

- délivrer des puissances plus importantes.

### ***Intégration / complexité***

L'évolution générale vers une intégration sans cesse plus poussée est dictée par des raisons non seulement d'encombrement et de temps de propagation entre circuits pour un nombre d'information à traiter de plus en plus grand, mais de reproductibilité (grandes séries) et de coût. La frontière de l'intégration se déplace sans cesse en termes de nombre d'éléments, de densité, de complexité comme le démontrent les évolutions récentes des circuits intégrés sur silicium.

L'intégration poussée est rendue possible par la conjonction de plusieurs facteurs :

- la diminution des dimensions des composants, accompagnée d'une amélioration des performances en termes de temps de transit et de temps de charge et de décharge, donc de temps de commutation de portes, ou de fréquence maximum de fonctionnement (temps de propagation de 17 ps par porte en technologie Silicium NMOS de 0,1  $\mu\text{m}$  de longueur de grille, de 21ps par porte en technologie ECL de 0,8  $\mu\text{m}$  de doigt d'émetteur). L'ensemble des composants passifs (résistances, condensateurs, filtres et résonateurs, dispositifs d'entrée/sortie et d'interconnexion) sont soumis aux mêmes exigences de miniaturisation;

- les progrès de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et la généralisation de son utilisation;

- l'existence de filières technologiques avec des procédés figés, fonderies auxquelles les utilisateurs peuvent s'adresser pour la réalisation de circuits personnalisés. Il est ainsi devenu possible de

concevoir et de réaliser des circuits à la demande (ASIC).

L'amélioration des performances passe aussi par la conception d'architectures de circuits spécifiques, adaptées à une fonction donnée, la vision par exemple. Les recherches sur les circuits neuro-mimétiques laissent présager des développements intéressants pour différents types d'applications.

L'accroissement de la complexité des circuits pousse à envisager des solutions tridimensionnelles, où l'on superpose plusieurs couches de transistors; cependant, les difficultés technologiques et le prix de revient ont freiné ce développement. Par contre, on observe un intérêt croissant pour les multicircuits (mosaïques de modules de microcircuits assemblés sur un même substrat silicium par billes fusibles) qui permettent de faire un pas de plus vers la concentration. Les interconnexions et le "*packaging*" sont des facteurs limitatifs pour lesquelles des solutions doivent être avancées. Par ailleurs, à côté des circuits purement digitaux, il apparaît des circuits "mixtes" posant des problèmes de compatibilité liés soit à la nature des signaux (analogique / numérique), soit aux différences de niveaux électriques (circuits de puissance). Dans le premier cas, la filière BICMOS, qui associe les technologies bipolaires et à effet de champ, fournit une solution très prometteuse et des études sont en cours sur l'Arséniure de Gallium (GaAs) pour l'utilisation de technologies "*normally-off*".

La diversification et la généralisation de l'utilisation de l'électronique dans tous les secteurs conduit à des études de fiabilité dans des environnements hostiles (hautes températures, radiations, rayonnements électromagnétiques, ...). Certaines technologies permettent de fabriquer des circuits intégrés fonctionnant à plus de 100°C. La résistance aux radiations est importante pour l'électronique embarquée ou l'instrumentation en physique des particules; les technologies SOI (Silicium sur Isolant), en particulier le SIMOX, donnent de bons résultats pour les circuits logiques et les études portent sur la réalisation de circuits analogiques. Les semiconducteurs III-V ont de bonnes propriétés

dans ce domaine. La protection des composants et des dispositifs contre les rayonnements électromagnétiques est devenue indispensable. L'étude de ces parasites, de leurs effets et des moyens de les supprimer, constitue une nouvelle discipline : la compatibilité électromagnétique.

A côté des circuits auxquels on demande une capacité de traitement de plus en plus grande se pose le problème de la capacité de stockage des informations. Les mémoires à semiconducteurs sont souvent données comme l'exemple type de l'accroissement de complexité des circuits. De nouvelles perspectives sont ouvertes dans le domaine de l'enregistrement magnétique avec l'utilisation de structures multicouches métalliques, devant permettre un enregistrement perpendiculaire haute densité, mais présentant également des magnétorésistances très élevées pour les têtes de lecture.

### **Montée en fréquence**

La réduction des dimensions des zones actives des composants a été l'élément déterminant dans la course aux hautes fréquences. Les transistors bipolaires silicium, avec des épaisseurs de base de  $0,07\ \mu\text{m}$  et des largeurs de doigt d'émetteur de  $0,35\ \mu\text{m}$  affichent des fréquences de transition de 40 GHz. Les semiconducteurs composés III-V bénéficient d'une meilleure mobilité des électrons, favorable à la rapidité, et les transistors à effet de champ MESFET sur GaAs atteignent, avec des longueurs de grille de  $0,2\ \mu\text{m}$  des fréquences de transition de 120 GHz.

La conception de structures nouvelles mettant à profit la possibilité de jouer sur la structure de bande du semiconducteur par l'introduction d'hétérojonctions entre deux matériaux différents ("*band gap engineering*") a permis d'aller plus loin. Les transistors bipolaires à hétérojonction (TBH) dans la filière GaAs ont des fréquences de transition de l'ordre de 140 GHz et sont maintenant utilisés dans des circuits commerciaux. Les propriétés des gaz bidimensionnels d'électrons se formant à l'hétérojonction permettent d'obtenir des transistors à effet de champ dans la filière GaAs ou dans la filière InP

avec des fréquences de transition de 300 GHz (utilisables jusqu'à 200 GHz). La possibilité récente de réaliser des hétérojonctions sur silicium avec les composés SiGe a permis de franchir une nouvelle étape dans cette filière avec des transistors bipolaires de 94 GHz de fréquence de transition.

Il faut noter par ailleurs les possibilités offertes, pour la commutation à des temps très courts ou le fonctionnement à des fréquences très élevées, par de nouvelles structures basées sur l'utilisation des effets quantiques comme les diodes et transistors à effet tunnel résonnant, et pouvant fonctionner à la température ambiante.

Les microtechnologies peuvent également dans le futur apporter des solutions nouvelles et performantes (microtubes à vide par exemple).

La fiabilité des composants miniaturisés doit être qualifiée et constitue un verrou pour les applications. La filière silicium a évolué et acquis au cours des ans la reproductibilité et la fiabilité indispensables, mais la filière GaAs n'a pas encore atteint la même maturité, a fortiori la filière InP. La complexité d'intégration reste donc très inférieure à celle du silicium (mémoires GaAs de 64 Kbit, alors que les mémoires Silicium sont à 16 Mbit). Les défauts de reproductibilité des niveaux de dopage ou des très faibles dimensions se traduisent par des variations des tensions de seuil dans les circuits digitaux et la réduction à l'extrême de la longueur de canal des transistors introduit des dysfonctionnements.

Par ailleurs, la rapidité intrinsèque très élevée des composants actifs impose une attention particulière à l'environnement de ces derniers, en particulier aux composants passifs associés, pour dégrader le moins possible les performances dans le processus d'intégration. L'utilisation de ces composants pour réaliser les dispositifs élémentaires de l'électronique (oscillateurs, amplificateurs, filtres et antennes actives) nécessite le développement d'outils de conception adaptés. Notons également que les méthodes de test des composants doivent suivre la montée en fréquence.



Parmi les voies exploratoires, la cryoélectronique peut permettre d'améliorer les performances des circuits. Par le refroidissement de composants, même classiques, on bénéficie de l'augmentation de la mobilité électronique à basse température et de la réduction du bruit thermique. L'utilisation de matériaux supraconducteurs, facilitée si les matériaux à haute température critique peuvent être utilisés, permettra de lever la limitation liée aux lignes d'interconnexions, dont l'influence devient prépondérante au fur et à mesure que les dispositifs sont intrinsèquement plus rapides. Les nouveaux matériaux supraconducteurs ont également relancé les études sur les composants Josephson. Enfin, de nouvelles structures à effet quantique peuvent être envisagées.

### **Montée en *puissance* et en *température***

Elle se manifeste dans tous les domaines de fréquences, au niveau des composants discrets et des ensembles intégrés.

En basse fréquence, la conception des circuits pour les convertisseurs statiques, mettant en œuvre des composants de puissance, nécessite une approche dispositifs électrotechniques/ convertisseur d'une part, et convertisseur/composants de puissance/commande d'autre part.

La conception de structures de transistors de puissance est spécifique et doit prendre en compte l'optimisation de la dissipation thermique. De nouveaux matériaux comme SiC ou même le diamant ouvrent des voies prospectives pour la tenue aux températures élevées.

En haute fréquence, les avancées du transistor bipolaire silicium le rendent concurrentiel pour les applications nécessitant de la puissance jusqu'à des fréquences de quelques GHz. Dans le domaine des microondes, les densités de puissance produites par les éléments discrets gardent des ordres de grandeur identiques jusqu'à 60 GHz. Pour dépasser cette limite, de nouvelles structures et filières doivent être proposées. Par ailleurs, la mise au point de configurations permettant de mieux combiner

les puissances produites par chaque élément et d'augmenter les rendements constitue un objectif majeur si Ton veut dépasser les limitations actuelles qui se concrétisent par une décroissance en  $1/f^2$ . De même, la montée en fréquence des circuits monolithiques de puissance, qui plafonnent actuellement vers 30 GHz, est une nécessité absolue pour leur utilisation pour des applications grand public (transports).

## **Applications et nouveaux développements**

L'application la plus évidente et la plus connue est l'informatique, en particulier la microinformatique. Le marché a été en forte expansion au cours des dernières années, et les besoins sont toujours croissants en capacité de traitement de l'information. Les équipements continuent à progresser en quantité et en qualité. La situation dans ce domaine est difficile en France et en Europe, mais il importe de travailler sur des composants et circuits stratégiques et de préparer les générations futures de dispositifs.

L'électronique professionnelle, incluant l'électronique militaire et les télécommunications, a également connu un essor important. Les télécommunications, avec le téléphone portable et électronique et les télécommunications spatiales, représentent un secteur où la France occupe une très bonne place. Les besoins évoqués plus haut - amélioration des performances par une augmentation de la complexité, des fréquences de fonctionnement et du débit - sont omniprésents. L'importance du marché nécessite également la recherche de solutions à faible coût et à faible consommation, par exemple pour les applications téléphone ou les liaisons mobiles satellites. Le domaine de la commande et du contrôle est appelé à se développer compte tenu là aussi des enjeux économiques.

Les développements en instrumentation pour la recherche nécessitent des performances très souvent bien au-delà de celles des composants et des circuits disponibles, surtout en ce qui concerne l'électro-

nique analogique. Les laboratoires sont ainsi amenés à collaborer étroitement avec les industriels pour stimuler et participer à des réalisations à la limite des technologies et même faire évoluer celles-ci.

Dans le domaine grand public, outre le téléphone déjà mentionné et le secteur audiovisuel, l'utilisation de l'électronique est en forte croissance dans les systèmes de transport, l'automobile en particulier, pour les aspects de commande, de sécurité, de contrôle de trafic et en domotique pour diverses commandes.

Dans ce contexte, il apparaît nécessaire de développer des microcapteurs intégrés de toutes sortes. Ces études bénéficieront des acquis dans le domaine des technologies microélectroniques. L'intégration maximale de différentes fonctions sera recherchée. On peut citer par exemple le développement de microantennes associées à des composants actifs microondes pour former des ensembles intégrés, ou encore la réalisation d'ensembles mixtes associant un dispositif microonde et un circuit de traitement de signal basse fréquence ou digital sur un substrat unique. Par ailleurs, l'environnement des circuits imposera un fonctionnement à haute température et des efforts devront être faits pour trouver des solutions dans ce sens.

Les enjeux économiques sont de toute évidence énormes, et dans un certain nombre de créneaux l'industrie française reste bien placée. Il importe donc de préparer l'avenir par une recherche en électronique au plus haut niveau.

## Moyens à mettre en œuvre

Outre l'aspect matériau mentionné par ailleurs, le développement de l'électronique s'appuie sur deux composantes indispensables : la technologie et la modélisation.

Sur le plan de la technologie, il convient de continuer à progresser sur toutes les étapes afin d'améliorer la reproductibilité, de permettre la réduction des dimensions, d'améliorer les perfor-

mances et la fiabilité. La lithographie, les dépôts de matériaux conducteurs et isolants, la gravure sont autant de procédés sur lesquels des progrès sont attendus. Les technologies "douces", assistées par plasmas, par ions ou par photons apportent des solutions intéressantes. Une meilleure compréhension des mécanismes, faisant appel à la physico-chimie des interfaces est indispensable pour progresser. Les contrôles in situ de plus en plus sophistiqués sont nécessaires.

La modélisation apporte des éléments indispensables au niveau de la technologie (simulation des différentes étapes), de la conception des dispositifs et des circuits et de l'analyse de leur fonctionnement, des interconnexions et du "*packaging*". Il lui faut prendre en compte les effets nouveaux liés à la réduction des dimensions (électrons chauds, inhomogénéités spatiales, effets quantiques). L'intégration introduit des couplages entre les différents éléments que l'on ne peut plus considérer comme indépendants. Si les modélisations particulières gardent tout leur intérêt pour la compréhension des phénomènes physiques, il est important de développer des modèles simplifiés pouvant être introduits dans des simulateurs de circuits. Très souvent, il devient nécessaire de coupler les modélisations électriques avec des modélisations électromagnétiques, thermiques, éventuellement mécaniques ou magnétiques, et de prendre en compte l'aspect tridimensionnel.

## L'électronique futuriste

La "Science des Molécules" dont l'impact est considérable (chimie fine, biologie, pharmacologie, etc.) ne pouvait pas rester à l'écart des défis que pose le développement de l'électronique. Au cours des dernières années, de nombreux travaux ont été consacrés à la conception et à la synthèse de "composants moléculaires", permettant d'effectuer une opération élémentaire de traitement avec quelques molécules : fils moléculaires canalisant un transfert d'électrons, diodes moléculaires, commande du transfert d'électron par des "transistors" ou des "portes logiques" moléculaires. Un des grands pro-

blèmes reste l'adressage, qui pourrait être électrique ou optique. Par ailleurs, la faisabilité de composants avec des semiconducteurs moléculaires suppose des caractéristiques de mise en forme du matériau et de dopage. Les phtalocyanines de terres rares et les oligomères de thiophènes peuvent être déposés en couche mince et des transistors à effet de champ ont été réalisés avec des caractéristiques comparables à celles du silicium amorphe.

Dans la voie de la miniaturisation poussée à l'extrême, il faut citer "l'écluse à électron". Les progrès de la technologie, permettant de fabriquer des dispositifs de dimensions inférieures à 100 nm, ont permis de démontrer la possibilité de manipuler des électrons un par un. Ces dispositifs ultra-miniaturisés présentent les avantages d'une grande rapidité et d'une très faible dissipation, mais fonctionnent à basse température.

### 3 - MATÉRIAUX

Pour l'ensemble des recherches menées aussi bien en optique qu'en électronique, le développement des matériaux est un point clé qui conditionne la conception et la réalisation des dispositifs. Les besoins sont très diversifiés : verres, cristaux isolants, semiconducteurs, supraconducteurs, matériaux organiques..., avec une importance considérable des couches minces. Les progrès ont été nombreux et souvent spectaculaires au cours des dernières années, mais l'attente est encore très forte vis-à-vis de nouveaux matériaux, ayant les propriétés "idéales" pour l'application visée.

Dans les domaines de l'électronique rapide et de l'optoélectronique, ce sont les semiconducteurs qui occupent la plus grande place. Les composés III-V ont des largeurs de bande interdite bien adaptées aux télécommunications. La possibilité d'obtenir des alliages ternaires ou quaternaires dans les filières GaAs ou InP, mais aussi avec des antimoniures, multiplient les possibilités de structures artificielles (puits quantiques, super-réseaux). Le développement des techniques d'épitaxie per-

mettant le contrôle des dépôts à l'échelle de la monocouche atomique est indispensable pour la réalisation de dispositifs et circuits micro-opto-électroniques de plus en plus miniaturisés. Les laboratoires doivent pouvoir suivre les évolutions de ces technologies pour rester au meilleur niveau (*Atomic Layer Epitaxy*, épitaxies localisées, croissances par la tranche, etc.). Le désaccord de maille cristalline entre le substrat et la couche épitaxiée introduit des contraintes, qui peuvent être maîtrisées et exploitées dans la réalisation de certaines hétérostructures. L'hétéroépitaxie de couches ultra-minces conduit à des systèmes de dimensionalité réduite (2D) où des effets quantiques se manifestent. Les technologies poussées de nanolithographie permettent de définir des fils (1D) ou des boîtes (0D) quantiques.

Les semiconducteurs II-VI ont pendant longtemps souffert de difficultés technologiques, mais un cap vient d'être franchi avec la maîtrise du dopage des deux types, N et P, pour la réalisation de jonctions P-N,

Les résultats récents sur la photoluminescence du silicium poreux illustrent les possibilités de l'électrochimie dans les domaines de la croissance et de la transformation des surfaces et ouvre des perspectives nouvelles dans la filière silicium.

Les supraconducteurs à haute température critique présentent un intérêt considérable, en particulier pour la réalisation de composants électroniques passifs, du fait de leur très faible dispersion et leurs très faibles pertes. Le plus répandu est l'oxyde YBaCuO, mais des composés au thallium (ThBaCaCuO) ou au bismuth (Bi,SrCaCuO), qui ont des températures de transition plus élevées, sont activement étudiés. Des performances remarquables ont été atteintes en technologies microruban et coplanaire pour des résonateurs, filtres, lignes à retard, ... L'intégration monolithique de composants semiconducteurs et supraconducteurs nécessite de rendre compatibles les technologies.

Des recherches sont en cours sur les diverses céramiques pour des applications aux condensa-



teurs, filtres ou résonateurs, composants hyperfréquences, ou substrats et boîtiers d'encapsulation. Par contre, peu de travaux sont faits sur les polymères à usage électronique, comme les thermoplastiques pour l'encapsulation ou les matériaux pour condensateurs,

Il faut signaler également les recherches sur des matériaux pour la furtivité électromagnétique, basés actuellement sur des composites, mais l'utilisation de polymères électroactifs dopés par des inclusions métalliques et l'optimisation de structures multicouches peuvent apporter d'autres solutions.

Des efforts importants sont faits sur les couches magnétiques ultraminces, porteuses d'espoirs pour l'enregistrement perpendiculaire ou les têtes de lecture. Les multicouches ou les super-réseaux alternant des matériaux ferromagnétiques et des milieux dia-, para- ou anti-ferromagnétique conduisent à des matériaux nouveaux aux propriétés ajustables.

Les couches minces sont omniprésentes dans la réalisation de dispositifs électroniques et optiques. Elles posent des problèmes d'élaboration, en fonction des matériaux à utiliser, de gravure pour la définition de motifs, de stabilité dans le temps liée à leur structure, de rugosité d'interface, de réalisation de systèmes multicouches. Il devient impératif de développer des actions pluridisciplinaires visant à comprendre, à chaque stade, le rôle des propriétés physico-chimiques des surfaces et des interfaces, et tout particulièrement celui de leur réactivité chimique vis-à-vis de leurs milieux environnants et de leurs conditions d'élaboration. La détermination des constantes optiques des matériaux en couches ultraminces, dans le domaine spectral des rayons X en particulier, ou en bord de bande d'absorption dans les semiconducteurs, doit être prise en compte.

Parmi les matériaux pour l'optique, le verre reste un matériau de base et est toujours l'objet de recherches pour élargir son utilisation : meilleure transparence dans l'UV et dans l'IR, indices plus élevés ou variables, faible coefficient de dilatation,

dopage pour obtenir des filtres colorés, etc. Les verres fluorés ont un intérêt potentiel pour les fibres optiques, lié à leur transparence dans le proche IR. Par ailleurs, le dopage des fibres en silice par des ions terres rares, l'erbium en particulier, permet d'obtenir des fibres amplificatrices et d'envisager ainsi des transmissions sur de très grandes distances sans répéteurs. Pour des liaisons courtes, la mise au point des fibres plastiques représente un enjeu économique important.

L'optique non-linéaire demande des matériaux dont les propriétés optiques dépendent fortement de l'intensité lumineuse qu'ils reçoivent. Les rendements de conversion doivent être suffisamment élevés pour permettre des utilisations à basse puissance (doublage en fréquence de l'émission des diodes laser par exemple). Les dispositifs non-linéaires pour le traitement optique du signal requièrent des matériaux associant une forte susceptibilité non-linéaire du 3<sup>e</sup> ordre à un temps de réponse court. Les matériaux photoréfractifs présentent de nombreuses possibilités d'applications (amplification cohérente, conjugaison de phase, déflexion de faisceaux, ...) mais le développement industriel se heurte à la maîtrise du matériau. Les recherches portent sur une meilleure compréhension des mécanismes de la photoréfractivité et sur l'élaboration de matériaux de caractéristiques données (oxydes BSO ou BGO, CdTe : Va, semiconducteurs III-V semi-isolants,...).

Pour l'optique non-linéaire comme pour l'électronique, les matériaux moléculaires ouvrent un champ d'exploration porteur d'espoirs. Ils présentent par rapport aux matériaux inorganiques des avantages potentiels :

- leurs propriétés physiques peuvent être modulées et optimisées en fonction des buts recherchés par une démarche d'ingénierie moléculaire;

- leur mise en forme s'effectue souvent par des méthodes "douces" (sublimation, spin-coating) et ils peuvent aisément recouvrir de grandes surfaces;

- leur polarisation est purement électronique,

ce qui leur confère une grande rapidité de réponse, atteignant le domaine des dizaines de GHz;

- ils peuvent par nature conduire à des circuits nanométriques si les problèmes d'adressage et de connectique trouvent des solutions.

Beaucoup d'efforts restent à accomplir en matière de mise en forme et de traitement de ces matériaux, compte tenu en particulier du niveau de qualité requis pour les composants optiques. Cependant, certains ont déjà débouché commercialement, comme le POM pour le doublage de fréquence en optique. Les réalisations mettant en jeu des effets cubiques (pour la bistabilité optique ou la conjugaison de phase) sont moins avancées. Ceci est probablement dû au manque de modèles simples permettant d'orienter les efforts de synthèse chimique pour obtenir de très fortes non-linéarités cubiques.

Enfin on peut mentionner le domaine des matériaux magnétiques moléculaires, notamment les bistables à transition de spin et les ferro- ou ferri-aimants moléculaires, le défi consistant dans ce cas à maîtriser l'arrangement tridimensionnel d'entités porteuses de moments magnétiques de manière à contrarier la tendance naturelle des spins à s'apparier.

## LA SITUATION

En optique, si la place de l'Europe est assez bonne, l'industrie française reste relativement faible, sauf dans des domaines comme celui du génie visuel, de l'optronique militaire ou dans quelques niches. Des efforts sont faits en instrumentation optique, mais on peut noter qu'ils sont encore souvent dispersés et les résultats sont irréguliers. La France occupe par contre une bonne position dans le développement des télécommunications optiques.

La situation de l'industrie électronique est difficile. La mise au point d'une filière compétitive est une gageure dans un domaine où les innovations

sont nombreuses, la technologie très sophistiquée (donc coûteuse) et où la fiabilité est impérative. Les industriels américains et européens ont signé de nombreux accords pour associer leurs efforts et réagir devant le dynamisme japonais. Le Japon lui-même a récemment enregistré un certain fléchissement du marché, et tous attendent les prémices d'une reprise économique. Cependant, dans certains secteurs (télécommunications, électronique professionnelle, composants passifs), la position française est assez bonne.

Dans ce contexte, quelle place peut occuper la recherche dans ces domaines et quel peut être son impact sur les évolutions futures ? La recherche est très active et de bon niveau, aussi bien en optique qu'en électronique, à la fois dans les organismes publics (CNRS, Universités, CEA, ...), dans les grands groupes industriels (France-Télécom, Thomson, Alcatel-AIsthom, Essilor, ...) et dans des PMI, en particulier en optique. Les interactions entre ces différents partenaires se sont beaucoup amplifiées au cours des dernières années, même si la disparité des moyens rend parfois le dialogue un peu difficile. La recherche doit permettre à terme à la France et à l'Europe de conforter leur place dans la compétition industrielle. Il est nécessaire pour cela d'être attentif aux problèmes actuels, mais aussi de se positionner en amont, dépassant les difficultés conjoncturelles pour préparer les nouvelles générations de systèmes. Un des rôles du CNRS sera de maintenir une recherche fondamentale de qualité dans ces domaines, assurant le renouvellement des connaissances et le maintien à niveau de la communauté scientifique dans ces secteurs stratégiques.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

L'optique et l'électronique sont par essence des domaines dans lesquels la pluridisciplinarité est présente. D'une part parce que le développement

des systèmes et des technologies fait appel à des connaissances variées : physique et physicochimie des matériaux, des surfaces et des interfaces, procédés d'élaboration et de traitement, conception assistée par ordinateur et simulation numérique, etc.; d'autre part parce que les avancées dans ces thématiques sont étroitement liées à celle de l'instrumentation qui a des besoins spécifiques appelant de nouvelles recherches, et qui met à profit au plus tôt les progrès réalisés tant en optique qu'en électronique.

Les relations entre l'optique ou l'électronique et les chimistes ou physicochimistes sont cependant jusqu'ici restées assez modestes et devraient être amplifiées à l'avenir, rapprochant les études sur les matériaux des préoccupations plus orientées vers les dispositifs et les systèmes.

De façon générale, il apparaît que la communauté scientifique en optique et en électronique est de façon contradictoire à la fois très structurée et très dispersée. En effet, la structuration est faite au travers de très (trop) nombreux Groupements de Recherche : on peut en dénombrer plus d'une quinzaine relatifs à des aspects divers de ces domaines. Il ne faut pas minimiser le rôle très bénéfique qu'ils ont eu pour rassembler les efforts de recherche sur différents types de matériaux (verres, semiconducteurs III-V, semiconducteurs II-VI, silicium, matériaux moléculaires, ...), sur une technique ou une technologie donnée (méthodes interférométriques en astronomie, microscopies en champ proche, interactions plasmas-surfaces, composants de puissance, capteurs, ...) ou encore sur certains types de systèmes. Cependant, ce découpage par "filière" plus que par thématique pourrait être revu pour évoluer vers des regroupements différents mieux adaptés aux évolutions actuelles. Le couplage entre l'optique et l'électronique bénéficierait d'un rapprochement plus structuré. On peut constater que, malgré les tentatives de redécoupage du Comité National, l'optique reste plus ou moins scindée en deux communautés qui auraient tout avantage à mieux se connaître.

Une des caractéristiques de la recherche en optique et en électronique est la sophistication

croissante des technologies à mettre en œuvre qui pousse à une centralisation des moyens. Un équilibre doit cependant être respecté pour que l'ensemble des laboratoires puisse travailler dans les meilleures conditions. On peut noter que les efforts d'équipement à l'étranger sont très importants (en Allemagne par exemple). Par ailleurs, cela nécessite la présence d'ingénieurs et de techniciens en nombre suffisant, ce qui est loin d'être le cas actuellement, et conduit à un fonctionnement aberrant au niveau des laboratoires. Ces équipements sont indispensables pour maintenir une recherche de pointe se situant en amont des préoccupations des grands groupes ou organismes qui sont dotés de moyens puissants. C'est à ce prix que le CNRS pourra conserver son rôle d'expertise, d'analyse des problèmes, d'avancée sur des sujets novateurs.

Par ailleurs, il faut continuer à favoriser les opérations de transfert vers le secteur aval, étape encore trop souvent mal résolue.

Si les régions et les grands programmes européens (dont la majorité concernent l'informatique, l'électronique et l'optique) peuvent apporter un financement appréciable aux laboratoires, ils ont parfois contribué à désorganiser les réseaux constitués entre laboratoires CNRS et universitaires français. Le CNRS doit veiller à la cohérence des programmes développés dans les différentes unités et réfléchir aux contraintes induites par ce nouveau contexte.

La formation est un point capital dans ces domaines. Il est important que l'optique conserve sa place dans l'enseignement. L'évolution rapide à laquelle sont confrontés les personnels de la recherche et les utilisateurs aussi bien dans les laboratoires que dans l'industrie rend nécessaire la possibilité de formation continue, et les laboratoires spécialisés doivent pouvoir jouer pleinement un rôle d'expertise et participer à cette formation.

**Suzanne Laval**  
Présidente du groupe 09



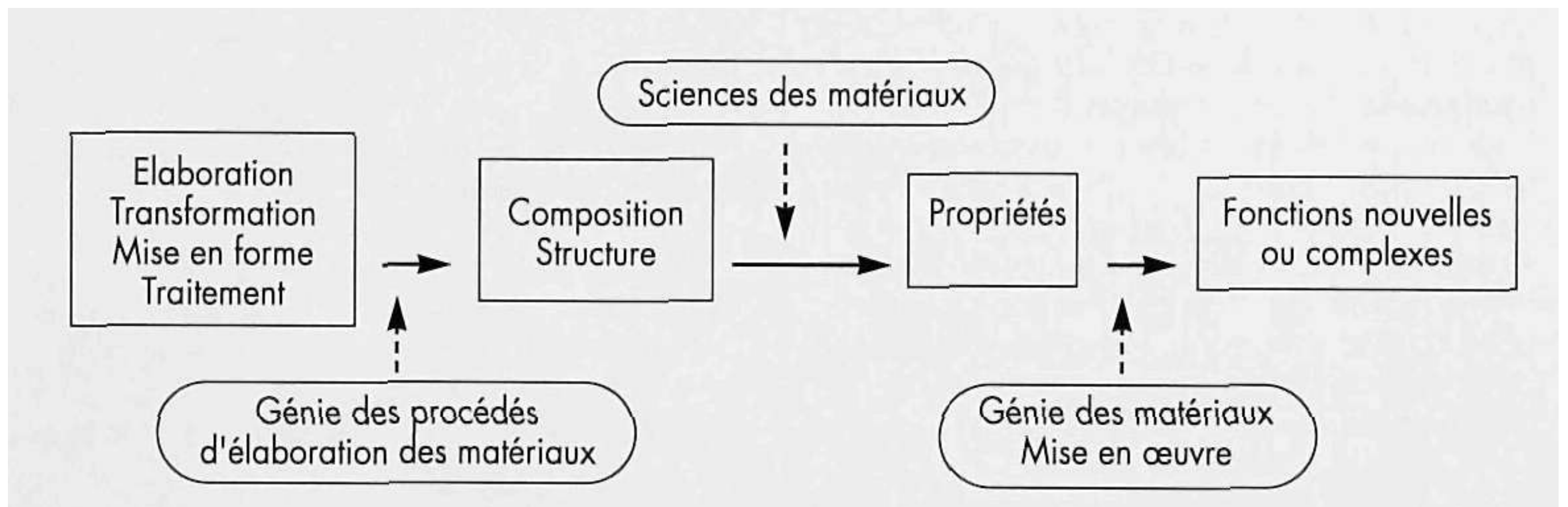
# 10

## MATERIAUX SPECIFIQUES POUR DES FONCTIONS NOUVELLES OU COMPLEXES

### INTRODUCTION

Un matériau existe par son usage. Des matériaux avancés chimiquement, physiquement ou technologiquement sont quotidiennement produits. Les besoins industriels, techniques, de sécurité, de mesure, ou encore d'environnement conduisent en premier lieu à définir la ou les fonctionnalités d'un matériau. Les domaines scientifiques interdisciplinaires tels que la physicochimie, les sciences des matériaux, le génie des matériaux et le génie des procédés d'élaboration des matériaux sont nécessairement mis en œuvre conjointement pour répondre à la demande. **Les Sciences des Maté-**

**riaux** s'attachent à analyser, comprendre et expliquer les propriétés du matériau. Elles permettent de définir d'autres types de matériaux à élaborer, avec de nouvelles propriétés. **Le Génie des Matériaux** s'occupe, une fois le matériau élaboré dans des conditions optimum, de tester les propriétés escomptées du matériau, de le remanier en vue de la fonction pour l'application visée. **Le Génie des Procédés d'Elaboration des Matériaux** permet de comprendre et maîtriser la relation entre les paramètres du procédé d'élaboration (le réacteur) et les propriétés du matériau. Il s'attache à définir le procédé adéquat pour obtenir les propriétés désirées *in fine*, à approfondir la connaissance et la compréhension de l'ensemble des phénomènes mis en jeu, et enfin à développer des moyens de contrôle du procédé.



L'interaction fluide / solide, développée lors de l'élaboration d'un matériau solide donné, induit des réactions hétérogènes et des transferts de masse et de chaleur qui sont en général couplés. Le rapprochement de domaines pluridisciplinaires associant Génie des Procédés / Fluides Réactifs / Interface / Elaboration des Matériaux conduit à définir une méthodologie permettant la maîtrise et l'optimisation du procédé d'élaboration du matériau. La simulation numérique de systèmes couplés (hydrodynamique, chimie, thermique) est un outil de plus en plus indispensable, et des approches couplant la description macroscopique et microscopique sont souvent nécessaires.

En conséquence, les fonctions d'un matériau massif ou en couche mince (ou moins mince) dépendront de ses propriétés intrinsèques et de son histoire. Les matériaux spécifiques pour des fonctions nouvelles ou complexes recouvrent un grand nombre de domaines. Sans être exhaustifs, nous avons retenu des matériaux dont les fonctions sont essentielles dans la vie industrielle d'aujourd'hui.

## BIOMATERIAUX

### 1 - LES ENJEUX

Les biomatériaux ou matériaux travaillant sous contraintes biologiques connaissent un développement très important dans le Traitement ou le remplacement d'organes ou de fonctions déficients : qu'il s'agisse de remplacements vasculaires et cardiaques, articulaires, osseux ou ligamentaires, des différentes structures de l'œil (humeur vitrée ou aqueuse, cristallin), des éléments de l'oreille interne, de la trachée, de la peau, des conduits urinaires ou autres, des biomatériaux dentaires, ..., leur développement s'intègre dans une démarche similaire. La part croissante de ces biomatériaux pour le traitement des handicaps de toute nature, la maîtrise

de leur fabrication, le contrôle de leur coût en font une voie prioritaire pour demain.

La compréhension intime de la physiologie de l'organe à remplacer avec tous ses aspects mécaniques et biologiques, l'évaluation des performances des matériaux existants, l'élaboration de modèles fiables appréciant les aspects mécaniques d'une part, biologiques d'autre part, de ces éléments de tolérance constituent les enjeux scientifiques de cette discipline. Par ailleurs, une démarche synthétique sur la biofonctionnalité des produits fait appel à des spécialistes de disciplines différentes (chimie des matériaux, physique, biologie) et à des utilisateurs.

### 2 - L'ÉVOLUTION, LES TENDANCES ET LA SITUATION

Le domaine des biomatériaux a moins de vingt ans. Les pays où la recherche est très étatisée, comme la France, ont pris en ce domaine un retard par rapport à d'autres comme les Etats-Unis, mais aussi le Japon, la RFA. De plus, en France, l'industrie des biomatériaux est le fait de PME qui n'ont généralement pas les moyens suffisants à l'échelle nationale pour investir dans une recherche à long terme.

Domaine interdisciplinaire par excellence, il impose *des* collaborations sans concurrence stérile entre les disciplines. Les problématiques actuelles doivent être définies par familles de produits, c'est-à-dire souvent par type d'organe à remplacer (œil, os, dent, valves). Il est donc impératif de favoriser les structures légères de rencontre de chercheurs de domaines différents et de développer, dans les grands laboratoires ou dans les écoles d'ingénieurs, des thèmes biomatériaux.

La France se caractérise dans le domaine des biomatériaux par la qualité et l'importance des recherches "matériaux", la qualité des utilisateurs avec un bon niveau chirurgical, mais aussi par l'insuffisance des structures ou des compétences charnières

qui seules permettraient d'assurer une crédibilité à ce domaine et aux industriels français qui en vivent. La faiblesse de la recherche structurée en ce domaine est notable, et on ne recense que très peu de laboratoires que l'on peut qualifier de "Biomatériaux".

Il existe, à l'initiative de l'INSERM, des structures associées privées essentiellement axées sur l'évaluation comme "Biomatech" ou le "CEMI". Le GIP "Thérapeutiques substitutives"<sup>11</sup> représente une tentative de rapprochement interdisciplinaire soutenu par l'industrie, mais l'investissement public y est insuffisant pour soutenir ce projet ambitieux.

### 3 - PERSPECTIVES

Les produits porteurs seraient les colles biologiques, des produits biorésorbables, des produits en contact avec le sang, des surfaces articulaires non sphériques, des céramiques améliorées composites, des matériaux composites déformables, etc.

Le CNRS pourrait entreprendre des programmes fondamentaux plus ambitieux concernant la carcinogénicité de certains produits (rapport avec l'état de surface, la configuration spatiale, la composition chimique), la compréhension de la réaction inflammatoire au contact de produits implantés ou encore la fonctionnalisation de polymères pour des fonctions spécifiques (anticoagulant, anticancéreux, accélérateur de la consolidation osseuse, etc.), et enfin les mécanismes d'action de certains produits tels que les processus d'interactions cristaux / protéines-cellules-tissus dans les céramiques bioactives comme l'hydroxylapatite, le phosphate tricalcique ou le carbonate de calcium.

Pour aborder ces problèmes, on peut proposer une démarche schématique consistant à identifier les points forts en élaboration de matériaux nouveaux, à trouver des applications biomédicales en relation avec les spécialistes biologistes et cliniciens du domaine, à créer les bases d'une rencontre interdisciplinaire sous forme de structures pluridisci-

plinaires avec ou sans murs travaillant sur l'élaboration du cahier des charges, la mise au point des produits, leur évaluation préclinique, l'explication de leur faillite, etc. Pour cela, il faudrait favoriser les rapprochements interdisciplinaires : accepter la notion de Professeur de Médecine issu du domaine SPI, et favoriser l'entrée d'ingénieurs dans des laboratoires biologiques ou de médecine. L'organisation actuelle des études doctorales devrait permettre ces rapprochements.

## MICROCAPTEURS ET MICROSYSTEMES INTÉGRÉS

### 1 - LES ENJEUX

Les progrès réalisés dans le domaine de la technologie et des moyens de production ont permis à la microélectronique et à l'optoélectronique d'atteindre, ces dernières années, un niveau de développement exceptionnel, tant dans la complexité des composants réalisés que du point de vue des performances (vitesse, ...), avec une réduction considérable des coûts.

Simultanément, se développait la notion de "Microsystèmes intégrés", dont l'enjeu est aussi important que celui de la microélectronique naissante des années 60. Les microsystèmes intégrés constituent l'étape suivante de la microélectronique. Les assemblages comportant capteurs, actionneurs, traitement du signal et source d'énergie doivent être réalisés de manière compacte et *collective* : toutes les branches de l'industrie (transports, télécommunications, domotique, contrôle) sont concernées par l'effort de R et D mis en place à l'échelle mondiale.

Le développement de microcapteurs et microsystèmes intégrés susceptibles d'atteindre, du point de vue des performances et du coût, un niveau



comparable à celui obtenu pour les composants microélectroniques, constitue un défi à relever dans les années à venir. C'est pour cela que plusieurs programmes de recherche ambitieux ont été lancés à l'étranger - Etats-Unis, Japon, Allemagne - et en France,

## 2 - LES AXES DE RECHERCHES

La nécessaire miniaturisation des dispositifs entrant dans les microsystèmes intégrés implique l'action concertée des scientifiques selon quatre axes principaux.

Le premier concerne les *matériaux* proprement dits, qui par leurs propriétés spécifiques sont susceptibles de fournir l'élément sensible (microcapteur) intégré dans le microsystème; le second se rapporte à l'étude des *interfaces* qui jouent un rôle essentiel dans le comportement des structures hétérogènes que Ton sera amené à réaliser; le troisième concerne les *matériaux artificiels* qui se prêtent bien à la mise en oeuvre de nouveaux concepts physiques, susceptibles d'applications nouvelles; le quatrième est lié à la physique et à l'étude du fonctionnement du dispositif, élément de base du microsystème intégré.

La mise en oeuvre de microcapteurs et microsystèmes intégrés repose sur l'évaluation des propriétés de matériaux nouveaux pouvant présenter des effets intéressants (électriques, optiques, magnétiques, physicochimiques...), mais également sur l'exploitation jusqu'ici non réalisée des propriétés de matériaux existants. La plupart des matériaux utilisés dans les microsystèmes devant se présenter sous la forme de couches minces, l'étude des processus de croissance et de greffage pour les matériaux moléculaires constitue un axe d'action privilégié. Les nombreux problèmes posés par la réalisation des dispositifs de type capteur tout électrique, capteur électro-optique, sont autant de sources d'études se rapportant aux interfaces : contrainte, défaut, réactivité, vieillissement.

L'intégration de structures hétérogènes pose d'emblée le problème de la caractérisation des interfaces. Il ne s'agit plus de considérer seulement le comportement des interfaces au travers de leurs effets sur les propriétés électroniques, mais aussi leur influence sur les propriétés optiques, mécaniques, par exemple. Il en est de même pour les interfaces mettant en jeu des matériaux présentant des propriétés chimiques ou biochimiques particulières, qui doivent être compatibles avec les fonctions des transducteurs électriques du signal à mesurer.

Les progrès obtenus dans les techniques d'épitaxie (CVD, MBE, OMCVD...) ont permis le développement d'une physique sur les structures artificielles à dimensionalité réduite, notamment dans le domaine de l'épitaxie de semiconducteurs III-V ou II-VI, aussi bien en électronique (HEMT...) qu'en optoélectronique (puits quantiques, lasers). Cette activité doit être élargie à de nouveaux matériaux. On devra également considérer l'utilisation des systèmes en environnement extrême : haute température, haute pression, effet des radiations, milieu agressif...

La suite logique des études précédentes consiste à examiner les propriétés du dispositif intégré. Cela suppose un gros effort de modélisation, compte tenu de la diversité des structures et des matériaux utilisés. La conception et l'architecture du microsystème doivent faire l'objet d'études nouvelles, tenant compte de la compatibilité des technologies mises en jeu. Des techniques hybrides sont peut-être à envisager. La modélisation des étapes d'élaboration des éléments sensibles doit être réalisée en même temps que celle du fonctionnement du dispositif électronique transducteur. Cela peut conduire à la conception de nouveaux types de circuit. D'autres aspects de la recherche concernant la métrologie du microsystème devront aussi être examinés, les problèmes étant beaucoup plus complexes du fait de l'utilisation de structures hétérogènes. Enfin, le vieillissement des microsystèmes et la Fiabilité constituent également des sujets d'études essentiels.

### 3 - LES MICROCAPTEURS CHIMIQUES

Un capteur chimique micronique est l'association d'un élément chimiquement actif, capable de "reconnaître" l'espèce à détecter (le récepteur) et d'émettre un signal chimique quand le contact se produit, et d'un transducteur capable de traduire ce signal en signal électrique. Celui-ci peut être un transistor à effet de champ, une fibre optique, une microbalance à quartz... Les difficultés de réalisation proviennent précisément de l'association de cette chimie de la détection avec les technologies utilisées pour le dépôt de la membrane et la physique du transducteur.

Le domaine des microcapteurs chimiques est par essence un domaine pluridisciplinaire qui nécessite des contacts entre partenaires d'horizons très divers. Cette exigence a entraîné la création récente de deux organismes qui visent à favoriser de telles coopérations comme :

- le Club Microcapteurs Chimiques (CMC 2) qui réunit des entreprises industrielles (40 %) et des laboratoires de l'Université et du CNRS (60 %).

- Le groupement de recherche MRT "Microcapteurs chimiques" qui coordonne les recherches sur programme de 11 laboratoires (de la conception des récepteurs à la réalisation technologique des capteurs) avec l'appui technique et financier d'entreprises.

Il faut signaler également la formation récente de réseaux européens sur les microcapteurs.

## MATERIAUX REACTIFS POUR LA CATALYSE

### 1 - LES ENJEUX

La catalyse joue un rôle économique majeur dans la production d'une gamme étendue de produits. Elle intervient dans la fabrication d'environ 90 % de tous les produits chimiques. Dans les grands pays industrialisés, près de 20 % du PNB repose sur la catalyse et, par conséquent, sur la maîtrise des catalyseurs, matériaux conçus pour des propriétés relationnelles spécifiques mais devant posséder des propriétés mécaniques particulières, capables d'être facilement régénérés ou recyclés et de respecter l'environnement (cf *infra* "Catalyse et protection de l'environnement<sup>1</sup>"). Intégrés dans des systèmes qui comprennent la réaction catalytique et sa mise en œuvre, ces matériaux d'importance stratégique possèdent une dimension supplémentaire par rapport aux matériaux conventionnels, puisque leur fonction essentielle réside dans leur capacité à accélérer une réaction chimique.

Dans la plupart des procédés chimiques, le coût du catalyseur ne représente qu'environ 0,2 % du prix de revient du produit fabriqué au contraire des matières premières qui contribuent à raison d'environ 70 %. Ces considérations économiques motivent l'étude de nouvelles matières premières abondantes (méthane, éthane, propane, azote, CO<sub>2</sub>...) offrant un accès potentiel aux grands intermédiaires de la chimie et de la pétrochimie. Leur transformation sélective constitue un enjeu scientifique, technique et économique considérable. A titre d'exemple, 40 % de tous les produits chimiques organiques sont dérivés de l'éthylène. Une nouvelle voie d'accès à l'éthylène, à partir de méthane ou d'éthane, représenterait un saut technologique par rapport à la synthèse actuelle par craquage thermique.

## 2 - L'ÉVOLUTION ET LES TENDANCES

Au cours des dix dernières années, près de 150 nouveaux, procédés catalytiques ont été commercialisés et de nouvelles technologies sont apparues dans des domaines aussi divers que l'époxydation asymétrique, la polymérisation des oléfines, le traitement des résidus et des effluents. Certains de ces développements ont été à la base de nouvelles productions, alors que d'autres ont permis révolution de procédés matures. La recherche en matière de catalyseurs s'articule autour de trois axes majeurs : (i) l'amélioration des catalyseurs et procédés catalytiques existants, en termes d'activité, de sélectivité, de durée de vie et de recyclage des catalyseurs, (ii) l'adaptation de systèmes catalytiques connus à des modifications de procédés existants, (iii) la mise au point de nouveaux procédés catalytiques.

La compréhension des processus chimiques mis en jeu est une étape essentielle pour la construction de catalyseurs que l'on pourrait qualifier de plus "intelligents". Celle-ci demande une approche pluridisciplinaire et une interaction très forte avec l'aval puisque le matériau catalytique doit répondre à un besoin (la préparation d'un produit) et est soumis à des contraintes (le procédé, l'économie, les réglementations sur l'environnement, etc.). La chimie moléculaire et la chimie du solide sont des sources de concepts, de matériaux modèles et nouveaux. L'étude fine des phénomènes nécessite, grâce à l'avènement d'outils informatiques performants, une interaction renforcée avec la chimie théorique et la modélisation. La modélisation porte également sur la simulation informatique de la réaction. Enfin, pour les catalyseurs hétérogènes, le développement des liens avec les sciences de l'interface (électrochimie interfaciale, corrosion, adhésion...) et la physique du solide s'accroît et doit offrir de nouvelles percées conceptuelles.

La maîtrise de la physicochimie de surface des catalyseurs hétérogènes constitue un point-clé, plus complexe et difficile que prévu, car les aspects de mobilité superficielle, de reconstruction de surface

et de phases adsorbées doivent être mieux pris en compte. Des techniques de détection des intermédiaires réactionnels permettraient d'établir des corrélations entre les propriétés de surface du solide et le comportement catalytique de celui-ci. L'instrumentation de haut niveau et la vision qu'un physicien des solides ou de la surface apporte à la compréhension des propriétés sont essentielles au développement d'une science catalytique.

Les croisements conceptuels doivent donc être généralisés, car ils amèneront le développement de nouveaux systèmes catalytiques. Le problème de l'énantiosélectivité, qui constituera l'un des grands défis de l'industrie chimique dans la décennie à venir, demandera la même approche. Dans une démarche plus pratique, la mise en forme du catalyseur s'accompagne d'opérations unitaires qui exigent une approche plus rigoureuse, destinée à en éliminer les aspects encore empiriques, causes de dysfonctionnements potentiels. Ce stade ultime de la mise au point des catalyseurs appelle aussi des interactions entre secteurs de la physicochimie des matériaux et des interfaces et génie des procédés.

## 3 - PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

L'accent doit être mis sur une approche concertée des défis actuels qui se posent dans le domaine de la catalyse. Ainsi, l'emploi de "nouvelles"<sup>11</sup> matières premières abondantes telles que le méthane, l'éthane, le dioxyde de carbone doit faire l'objet d'approches multiples. L'effort doit être poursuivi dans la recherche de systèmes hypersélectifs conduisant à des procédés propres sans rejets. De même, l'impact croissant de la catalyse dans l'élaboration de molécules de plus en plus complexes devra s'accompagner d'études poussées dans le domaine de l'énantiosélectivité. Dans ce contexte, la conversion des matières premières issues de la biomasse (dépassant largement la production de pétrole brut) doit être systématiquement recherchée.



Dans le domaine de la catalyse acide, les matériaux zéolithiques, les argiles et autres composés lamellaires - voire les nouvelles formes de carbone - devraient à terme se substituer aux acides liquides très polluants des procédés actuels. Dans le domaine de la catalyse métallique, des progrès doivent être attendus d'un meilleur contrôle du site actif et de son environnement : promoteurs ou autre métal en décoration, agrégats métalliques triés permettant un calibrage précis de la taille des particules, colloïdes, ligands de surface modifiant le site catalytique...

L'effort doit s'accroître dans le domaine de la catalyse en milieu polyphasique et dans l'utilisation de membranes catalytiques. Ainsi, les limites de la technologie catalytique actuelle pourraient être dépassées grâce à des mises en forme nouvelles de formulations catalytiques connues. La mise au point de membranes et des procédés correspondants, par l'étendue des compétences qu'elle requiert, ne peut se concevoir qu'à travers une large collaboration, allant de la synthèse de matériaux avancés jusqu'à la maîtrise du génie du réacteur membranaire.

La catalyse supramoléculaire à base de métaux ou de complexes moléculaires va nécessiter des structures hôtes pour l'accueil de ces espèces. Compte tenu de leur encombrement, mais aussi pour rendre le système plus sélectif et stable, il sera nécessaire de développer des solides mésoporeux organisés ou cristallisés. En outre, la synthèse de molécules complexes nécessite souvent des catalyseurs polyfonctionnels. Un contrôle fin de ces catalyseurs passe par une connaissance accrue de l'interactivité des sites, domaine encore mal connu actuellement.

Enfin, la stabilité étant un paramètre déterminant du procédé, un effort particulier doit être consenti pour améliorer la stabilité thermique, voire la tenue mécanique des catalyseurs. Il sera également nécessaire de poursuivre les efforts dans le domaine de la tenue des catalyseurs en conditions extrêmes et d'explorer la catalyse en milieu superdilué, notamment dans le domaine de l'environnement (air, mais aussi eau).

Ces interactions doivent être entretenues afin d'assurer le développement de la science catalytique et son approche de plus en plus ciblée dans l'élaboration de matériaux catalytiques. Les programmes du CNRS visant à favoriser la rencontre de spécialistes de différentes disciplines (ATP, GdR...), d'universitaires et d'industriels (UMR) doivent être maintenus et amplifiés.

Les microscopies analytiques et microscopies en champ proche, lorsqu'elles sont associées à un outil théorique, interviendront d'autant plus que les stations de travail informatiques qui apparaissent actuellement, aident à l'analyse des données. Les grands instruments jouent déjà un rôle de premier plan dans l'analyse à l'échelle atomique. La lumière synchrotron doit permettre de suivre dans les conditions de la réactivité, à l'échelle de quelques millisecondes, l'évolution structurale et chimique d'un système catalytique. Le développement d'autres techniques (IR, spectroscopie Mössbauer...) doit aussi être encouragé.

Les études cinétiques restent un outil indispensable à la compréhension du phénomène catalytique. Leurs résultats constituent la base du développement des procédés industriels. Ces études doivent être systématiques et prendre en compte les problèmes physiques liés au réacteur. Elles doivent également tenir compte des conditions expérimentales réelles.

Enfin, les collaborations doivent être fortement encouragées entre chimistes, physicochimistes des surfaces, physiciens et spécialistes de catalyse apportant leur approche propre à travers la partie empirique de leur savoir; cette approche devrait conduire à une définition commune des concepts, source de liens étroits entre disciplines et gage de propositions de modèles prédictifs utilisables par les expérimentateurs, du moins pour des catalyseurs modèles. Dans ce cadre, les contacts avec la recherche industrielle sont plus que jamais nécessaires. Un tel objectif ne peut être atteint que par le biais d'une actualisation des connaissances prodiguée par des écoles d'été et des colloques pluridisciplinaires dont l'ampleur devrait s'accroître. La ca-

talyse reste encore éloignée des domaines classiques d'enseignement (second cycle universitaire) : il paraît nécessaire de l'enseigner plus tôt qu'actuellement.

### **Catalyse et protection de l'environnement**

L'utilisation de catalyseurs pour traiter les effluents et combattre diverses formes de pollution augmente sans cesse. Le chiffre d'affaires annuel des catalyseurs s'élève, au plan mondial, à une trentaine de milliards de francs, réparti à raison d'environ 45 % pour la dépollution, 30 % dans les procédés chimiques et 25 % dans le raffinage pétrolier. Le traitement catalytique des effluents, que ce soit ceux liés aux transports ou ceux des procédés industriels, croît très rapidement : cette croissance résulte surtout de la généralisation des pots catalytiques, bien que le besoin de traiter et réduire les émissions des industries chimiques et pétrochimiques soit de plus en plus ressenti.

La catalyse doit aussi permettre à l'industrie chimique de répondre progressivement aux nouvelles normes de préservation de l'environnement prises au niveau européen et mondial, y compris les restrictions envisageables dans le transport de certains produits chimiques intermédiaires, impliquant ainsi une meilleure intégration des procédés. Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des technologies propres, fondées sur des procédés catalytiques respectueux de l'environnement, car évitant la formation de sous-produits ou intermédiaires non valorisables, ou posant des problèmes de pollution, de toxicité, d'effets secondaires ou de sécurité. Ces buts peuvent être atteints grâce à un accroissement de la sélectivité des procédés dont le catalyseur constitue la pièce maîtresse. La production de principes actifs pharmaceutiques et phytosanitaires exigera à court terme de nouveaux catalyseurs permettant d'accéder à la synthèse directe de molécules optiquement pures. Parmi tous les types de procédés catalytiques, ce sont les oxydations d'hydrocarbures qui présentent en général les sélectivités les plus faibles, et ce handicap se traduit

par des exigences de séparations et purifications complexes et coûteuses. Par ailleurs, de nouveaux catalyseurs comme les catalyseurs biomimétiques, fonctionnant dans des conditions plus douces, favoriseraient une économie de matières premières et d'énergie. Enfin, une technologie propre doit éviter la pollution liée à l'emploi du catalyseur lui-même, qui doit pouvoir être récupéré ou recyclé d'une façon écologique et économique.

## **MATERIAUX POUR LE GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Etant donné la qualité des recherches menées en France dans ce domaine, nous avons voulu, sans être exhaustifs, en citer le plus grand nombre.

### **1 - MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES**

Dans le cadre des applications au Génie Électrique, les buts poursuivis sont essentiellement :

- la production, le transport ou l'utilisation de l'énergie électrique avec le souci permanent d'économiser l'énergie;
- le développement de machine et (ou) de systèmes d'électronique de puissance de plus en plus sophistiqués et performants;
- l'augmentation des fréquences de fonctionnement des dispositifs, qui va souvent de pair avec la miniaturisation des systèmes.

**Les matériaux magnétiques "doux"** se présentent sous quatre formes :

*Les tôles Fe-Si à grains orientés à structure de GOSS* qui sont utilisables en champ alternatif puissant et non tournant. Leurs performances peuvent

être améliorées en diminuant l'épaisseur des tôles ( $< 0,1$  mm) de telle sorte à augmenter l'amortissement des courants de Foucault, en réduisant la taille des domaines magnétiques sans modifier la taille des grains, et en augmentant leur résistivité par l'utilisation d'additifs (Si  $> 3$  % ou Al + Si) ne perturbant pas la structure de GOSS.

*Les tôles Fe-Si à grains orientés à structure cubique qui*, en raison de leur texture, auraient l'avantage de présenter deux directions perpendiculaires privilégiées d'aimantation facile et seraient donc bien adaptées aux dispositifs à champ tournant

*Les tôles Fe-Si à grains non orientés* qui sont destinées aux applications en champ tournant. Leurs performances peuvent être améliorées en employant les mêmes techniques que pour les tôles Fe-Si à grains orientés à structure de GOSS.

Enfin, *les matériaux amorphes* qui n'ont pas encore connu en France le succès rencontré aux Etats-Unis et au Japon du point de vue des applications. Ces matériaux sont amenés à prendre dans l'avenir des parts de marché de plus en plus grandes, aussi bien en électronique qu'en génie électrique malgré leur extrême fragilité mécanique actuelle, ils peuvent également concurrencer les ferrites.

Pour les **Matériaux magnétiques durs**, les recherches sur les alliages binaires et ternaires (éléments de terres rares + éléments 3d) doivent être poursuivies dans la mesure où rien ne permet de penser que les bases connues (SmCo, FeNdB, nitrures et carbures de Fe + TR) soient les seules présentant toutes les caractéristiques intéressantes, à savoir : ferromagnétisme avec aimantation à saturation suffisante,  $T_c$  élevée et anisotropie induite grande. L'étude des propriétés des phases intermétalliques Fe + TR obtenues après nitruration ou carburation et présentant une  $T_c$  élevée ( $400^\circ\text{C}$ ) est également très importante. Enfin, l'étude des mécanismes de frittage (chimie des joints de grains, mobilité en fonction des désorientations, etc.) qui jouent pour les aimants un rôle analogue à la recristallisation dans le cas des matériaux doux doit aussi être maintenue.

En ce qui concerne les **Matériaux à magnétostriction géante**, il est important de rechercher des procédés de fabrication devant conduire à une meilleure tenue mécanique.

Les recherches sur la modélisation numérique du comportement des matériaux magnétiques, ainsi que sur les très nombreuses applications de matériaux magnétiques à des transducteurs inductifs, magnétostrictifs, à des capteurs, à des actionneurs, etc. doivent être développées.

## 2 - LES MATÉRIAUX ISOLANTS

Les besoins se font sentir dans le domaine des *composants passifs* (condensateurs et transformateurs notamment) et des *composants actifs*.

Les **matériaux polymères** se présentent sous forme soit de films, soit de composés massifs. Pour les films, les recherches doivent conduire à une augmentation des puissances réactives des condensateurs et à la miniaturisation de ces composants (films ultra-minces de polymères imprégnés ou non), à l'élaboration de composites thermostables pour le matériel électrotechnique, à l'élaboration de co-polymères de composés fluorés (type PVDF) capables de quadrupler la permittivité diélectrique. Ces progrès sont en fait indissociables des processus de traitements de surface de ces films. Pour les matériaux massifs, l'utilisation du polyéthylène pour les câbles de transport d'énergie à 500 kV passe avant tout par des études des phénomènes disruptifs dans ces matériaux.

Le développement des **matériaux céramiques** est lié à la chimie des poudres et à la maîtrise des phénomènes physiques aux joints de grains. Des permittivités relatives de l'ordre de  $10^4$  à  $10^5$  sont envisageables. Leurs principales applications sont les condensateurs, les varistances (oxydes de Zn, Bi, Co...), les thermistances et les substrats isolants à forte dissipation thermique (AlN, SiC...).



Les études sur les matériaux isolants eux-mêmes doivent être accompagnées d'études complémentaires sur la compatibilité chimique sous champ électrique avec d'autres matériaux et sur l'évaluation des pertes diélectriques et le vieillissement sous contrainte. Par ailleurs, l'utilisation des gaz rares liquéfiés ou de liquides organiques tels que le tétra-méthylsilane impose des études sur leurs phénomènes de transport sous haut champ.

### 3 - MATÉRIAUX SEMICONDUCTEURS

Seules les recherches sur les *composants de puissance à semiconducteurs* ont été envisagées ici. En électronique de puissance, les enjeux concernent l'accroissement des tensions de claquage des composants, l'augmentation des fréquences de travail et des Températures de jonction. De plus, des efforts considérables sont entrepris pour miniaturiser ces composants. Le *silicium*, bénéficie des évolutions de la microélectronique concernant l'épithaxie épaisse peu dopée pour augmenter les champs d'avalanche (et donc les tensions inverses), la création de défauts par irradiation pour diminuer la durée de vie des porteurs en excès, l'obtention de composants de puissance par des techniques de "*direct wafer bonding*" (composants à haute température de jonction ou circuits intégrés de puissance), Le *GaAs* est attractant du fait de son gap et de sa mobilité électronique élevés; mais malheureusement les technologies de type "planar" ne s'appliquent pas en raison de la difficulté à réaliser des couches d'oxydes sur *GaAs*, Ainsi, il semble que la technologie *Si* soit suffisamment bien implantée pour ne pas être concurrencée par le *GaAs*, sauf pour les applications haute fréquence (téléphonie par exemple). La maîtrise du *SiC* serait intéressante en vue de l'élaboration de composants à température de jonction élevée, Enfin, pour le *silicium amorphe*, il y a des problèmes de stabilité du matériau. De nouvelles techniques de dépôts (décomposition de  $\text{SiH}_4$  par décharge lumineuse en présence d' $\text{He}$ ) devraient cependant permettre à la fois d'augmenter les vitesses de dépôt en préservant l'adhérence et d'augmenter la stabilité dans le temps du matériau.

## 4 - MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

### Supraconducteurs "basse température"

Un état de veille active est à maintenir dans le domaine des supraconducteurs "basse température" (Supra de type H), Il serait notamment intéressant de réduire les dissipations à 50 Hz en champ fait des câbles multibrins de NbTi. Enfin, les travaux sur les phases de Chevrel ( $\text{PbMo}_6\text{S}_8$  + dopants) mériteraient d'être intensifiés au vu des résultats encourageants déjà obtenus.

### Supraconducteurs "haute température"

80 % des applications en Génie Electrique portent sur le 50 Hz, On est encore actuellement très loin de disposer de "câbles" supraconducteurs HT comme c'est le cas avec les SCBT. Pour les applications à courant continu, seules des céramiques *massives*, encore *peu performantes*, sont disponibles sur le marché, ce qui réduit doublement les applications potentielles. Un effort très important doit donc être fait dans ce domaine (matériaux textures sous champ ou sous gradient thermique par exemple)- Pour ce qui concerne les *couches minces*, les progrès passent à la fois par l'amélioration de l'adaptation des substrats au type de matériau qu'on utilise, le contrôle de la phase initiale de l'hétéroépithaxie et un meilleur contrôle de la croissance des couches (in situ si possible) ou des flux de dépôt. Enfin, comme il serait fondamental de pouvoir élaborer des "*câbles*" *SCHT* présentant une certaine flexibilité, la technique utilisant des poudres céramiques gainées mériterait d'être approfondie.

## 5 - POLYMÈRES CONDUCTEURS INTRINSEQUES ET EXTRINSEQUES

En raison des nombreuses applications potentielles (capteurs, blindages, connectique, batteries, etc.), la maîtrise de l'élaboration, du traitement et de

la modélisation physique de ces matériaux est fondamentale. Pour prendre un exemple, les études sur la mise au point de la méthode de percolation et sur la théorie des milieux effectifs doivent être poursuivies.

## ELECTRONIQUE

Les progrès réalisés dans le domaine de la technologie et dans les moyens d'élaboration de matériaux conduisent à privilégier dans les années à venir les axes suivants :

### Matériaux SiGe et siliciures

La croissance de l'alliage  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  en couche pseudomorphique sur Si, sous forme de super réseaux ou puits quantiques, ouvre la voie à de nouvelles possibilités d'ingénierie de matériaux et composants jusqu'ici réservés aux matériaux III-V. Si d'ores et déjà l'utilisation de SiGe s'est avérée bénéfique pour le développement de bipolaires performants, il est possible que l'utilisation d'effets et/ou de technologies ayant fait leurs preuves dans le domaine des hétérostructures III-V puisse avoir des conséquences très positives (transistors MODFET par exemple). De même, dans le domaine des détecteurs infrarouges (8-12  $\mu\text{m}$ ), l'utilisation de puits ou de super réseaux  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  Si par transition entre sous bande de valence peut ouvrir une nouvelle voie pour réaliser des détecteurs performants en utilisant la technologie silicium.

Un autre aspect important concerne la possibilité d'utiliser comme émetteur de lumière visible le silicium poreux obtenu par oxydation anodique. Dans le même ordre d'idée, on peut penser aux siliciures semiconducteurs épitaxiaux tels que  $\text{FeSi}_2$  ou  $\text{CrSi}_2$  ou à en développer d'autres (ternaires ?) Enfin, l'étude de structures quantiques (1D, QD) dans Si est à explorer en vue de propriétés opto-électroniques nouvelles.

### SiC

L'élaboration et la technologie du matériau SiC font des progrès qui permettent de penser qu'il s'agit d'un matériau important pour les dispositifs de puissance et HF fonctionnant à haute température (600°C). Il s'agit aussi d'un matériau très intéressant pour les capteurs ou transducteurs fonctionnant à haute température : photodétecteur, diode électroluminescente, etc. mais cela implique d'avoir comme objectif l'étude poussée des divers procédés d'élaboration ainsi que celle de ses propriétés fondamentales. Une autre voie pour SiC concerne son utilisation comme matériau grand gap dans une hétérojonction SiC/Si avec, là encore, des analogies bénéfiques avec les matériaux III-V (par exemple, l'utilisation de SiC en émetteur dans des dispositifs de TBH rapides).

### Matériaux III-V (hormis micro-optoélectronique)

L'étude de la croissance et de la technologie des matériaux III-V à grand gap GaN, AlN, InN peut s'avérer intéressante pour le développement d'émetteurs bleus et de dispositifs fonctionnant à haute température. La filière GaAs, plus mature que celle de SiC, est potentiellement intéressante pour le développement de circuits électroniques et capteurs fonctionnant jusqu'à des températures de 400°C. Au niveau des capteurs et transducteurs, la filière GaAs est à approfondir, les capteurs (pression, piezoélectriques, magnétiques...) et les micro-dispositifs III-V étant relativement peu développés malgré leur forte potentialité.

### Diamant

Le diamant a des propriétés mécaniques, optiques (transparence de 0,15 à 4 eV), thermiques (5 fois plus conducteur que le cuivre), électriques (semiconducteur avec des mobilités d'électrons et de trous  $> 1800 \text{ cm}^2 \text{ v.s}$ ) et réactives (inertie chimique, résistance aux radiations) exceptionnelles. Son dépôt en couches minces par CVD à basse pression

et températures  $< 1000^{\circ}\text{C}$  ouvre des champs nouveaux tant pour la recherche de base que pour les applications. Il reste à maîtriser la nucléation-croissance, à réussir l'hétéroépitaxie, à connaître et contrôler ses états localisés liés à des impuretés (en particulier l'azote) et/ou à des défauts de structures (dislocations, fautes d'empilement..) et finalement à comprendre le dopage p (bore), confirmer le dopage n (phosphore ?), et à passer au dopage par implantation.

A côté de ces sujets très en pointe, il ne faut pas oublier des thèmes plus classiques portant sur la réalisation de circuits VLSI silicium de très grande rapidité, la maîtrise et le développement de dispositifs et circuits hyperfréquence et micro-ondes, ainsi que la poursuite des progrès dans le domaine de l'optoélectronique intégrée.

## Matériaux magnétiques pour l'enregistrement

Les matériaux et systèmes pouvant améliorer les performances de l'enregistrement magnétique (densité d'intégration, temps d'accès, débit d'information) sont liés aux propriétés exceptionnelles mises en évidence de multicouches métalliques :

- possibilité d'enregistrement magnétique vertical,
- magnétorésistances géantes, par exemple dans  $(\text{Co/Cu})_n$  pour capteurs et têtes de lecture magnétorésistives multipistes,
- multicouches  $(\text{Co/Pt})_n$  à effet magnétooptique renforcé dans l'UV par la forte polarisation de spin des états excités (effets  $\times 2$  par rapport aux alliages TbFeCo des disquettes magnétooptiques actuelles).

## Matériaux supraconducteurs

La synthèse des multicouches supraconductrices à haute température critique ( $T_c$ ), encore à l'état embryonnaire au niveau national, mérite très

fortement d'être encouragée, car ces structures sont l'entrée au monde encore potentiel des dispositifs électroniques supraconducteurs à électrode de contrôle. Elles sont aussi les systèmes modèles pour vérifier les idées théoriques relatives à la physique des matériaux de basse dimensionalité et des interfaces. Des éléments de progression seront d'une part une meilleure compréhension des propriétés physiques des matériaux à haut  $T_c$ , en particulier celles de l'état normal, d'autre part les avancées parallèles dans l'élaboration des supraconducteurs à haut  $T_c$  sous forme de fils et rubans développés pour les applications en courant ou/et champ magnétique élevés.

## Matériaux piézoélectriques

Le fort développement des microtechniques induit une demande dans le domaine des couches minces piézoélectriques déposées sur verre, métal ou silicium pour la génération et la détection d'ondes élastiques. Dans les microcapteurs et les microrésonateurs piézoélectriques, le nitrure d'aluminium AlN et l'oxyde de zinc ZnO en couches minces de 5000 Å à 20 000 Å sont bien adaptés et les études de matériaux concernent le lien entre croissance et contrôle des modes de vibration. Pour les déplacements mécaniques plus importants par déformation lente des microactionneurs et *des* micromoteurs piézoélectriques des couches épaisses ( $\approx 10 \mu\text{m}$ ) de ZnO ou AlN sont alors nécessaires; les problèmes de croissance à résoudre concernent l'homogénéité des propriétés mécaniques et piézoélectriques, l'adhérence sur le substrat de base, la dégradation naturelle dans le temps ou due à l'environnement.

## Electronique moléculaire

Les progrès réalisés dans l'ingénierie moléculaire ont permis le développement récent d'un nouveau domaine, celui de l'Electronique moléculaire, qui se situe aux frontières de la chimie avec la physique et avec la biologie. Un premier thème concerne le développement d'une nouvelle génération de



matériaux moléculaires, issus de l'assemblage ordonné de molécules dont les propriétés électroniques sont contrôlées. La maîtrise des propriétés électroniques de ces matériaux, qui s'exerce à la fois au niveau moléculaire et au niveau de l'assemblage, a permis récemment de réaliser différentes classes de semiconducteurs organiques dérivés de phtalocyanines ou de polymères et d'oligomères conjugués. Les caractéristiques de composants électroniques, diodes électroluminescentes et transistors à effet de champ, réalisés à partir de ces matériaux moléculaires, comparables à celles des matériaux inorganiques présentent un grand intérêt, à la fois sur le plan fondamental pour la compréhension des processus de génération de transport et de recombinaison de charges, et sur le plan appliqué comme le soulignent les caractéristiques de composants électroniques réalisés à partir de ces matériaux moléculaires, diodes électroluminescentes et transistors à effet de champ, qui sont comparables ou supérieures à celles de composants dérivés de semiconducteurs inorganiques. La modulation des propriétés électroniques, associée à leur variabilité chimique moléculaire, et le contrôle de l'organisation supramoléculaire ouvrent des voies potentielles extrêmement prometteuses. Un second thème se propose, comme objectif, la réalisation de fonctions élémentaires de l'électronique au niveau d'un même système moléculaire. Des molécules complexes ont déjà été synthétisées, dans lesquelles des opérations de transport de charge, de commutation ou de mémoire ont été caractérisées, ouvrant ainsi la voie aux "composants moléculaires". Ainsi des transferts électroniques directionnels à l'image du centre actif de la photosynthèse ont été démontrés, première étape vers la réalisation de diodes rectifiantes à l'échelle moléculaire. Les problèmes de mise en forme et d'adressage de ces systèmes moléculaires sont évidemment complexes, mais de récentes techniques telles que *hole burning*, ou microscopies à champ proche, qui autorisent un nanoadressage, constituent des voies expérimentales intéressantes pour faire progresser ce thème. La maîtrise de tels systèmes moléculaires pourra conduire, dans une étape ultérieure, à des architectures plus complexes s'appuyant sur les réseaux de neurones ou automates cellulaires.

Le caractère très pluridisciplinaire de ce nouveau domaine de l'Electronique moléculaire, associant chimistes, physiciens, biologistes et mathématiciens, mérite enfin d'être souligné.

## MATERIAUX POUR L'OPTIQUE

L'optique, discipline souvent considérée comme traditionnelle, subit une profonde mutation, avec notamment le développement de l'optoélectronique, ainsi que l'apport de la physique des solides et de la science des matériaux : lasers et détecteurs à semiconducteurs, fibres optiques à faible atténuation, matériaux non linéaires, etc. Elle a accompli des progrès évidents, avec des retombées économiques et humaines importantes allant des télécommunications à la médecine.

Dans ce contexte multidisciplinaire, la science des matériaux joue un rôle déterminant. Les sollicitations sont très diverses :

- recherche de nouvelles solutions pour accompagner l'évolution constante de matériaux traditionnels, tels que le verre, qui doit répondre à des demandes spécifiques selon l'application (lunetterie, génie civil, transmission par fibres optiques);

- conception et élaboration de matériaux nouveaux et plus performants pour la génération, la détection, le traitement, le stockage du signal optique;

- mise en forme de ces matériaux pour leurs multiples applications (métrologie, télécommunications, traitement des images, ...).

En termes de recherche, ces sollicitations impliquent le plus souvent un effort renouvelé sur le plan fondamental pour comprendre les mécanismes physiques mis en jeu dans l'émission, la propagation, l'interaction de la lumière avec le milieu. En

même temps, les technologies d'élaboration prennent une importance de premier plan. C'est déjà le cas pour les structures à semiconducteur, où les techniques d'épithaxie deviennent de plus en plus sophistiquées, mais la tendance s'affirme aussi dans d'autres secteurs tels que les multicouches diélectriques, les verres pour fibres optiques,... Il faut noter que les techniques optiques (ellipsométrie, réflectométrie, ...) souvent utilisées jusqu'ici pour la caractérisation *a posteriori* des matériaux, s'intègrent de plus en plus avec les techniques d'élaboration pour offrir, *in situ*, un moyen privilégié d'étude et de contrôle.

Les semiconducteurs occupent une place particulièrement importante en optique; la maîtrise des conditions d'élaboration (épithaxie) permet de tirer parti d'effets quantiques élargissant le domaine spectral couvert et augmentant les performances. Les *diodes laser à puits quantiques* à base de semiconducteurs composés III-V sont déjà largement utilisées dans les télécommunications optiques, et de nouvelles applications (pompage des lasers solides, amplification, enregistrement, magnétique, reprographie,...) incitent à fabriquer et à étudier de nouveaux alliages ternaires et quaternaires, en exploitant souvent les effets de contrainte liés aux différences des paramètres cristallins des différentes couches. On retrouve naturellement ces mêmes semiconducteurs dans la *détection dans le visible et le proche infra-rouge*; pour les longueurs d'onde plus élevées, les antimoniures et les semiconducteurs II-VI sont toujours l'objet de recherches intensives, portant tant sur leur élaboration que sur l'étude de leurs propriétés. Dans le domaine des *matériaux non linéaires* (effets photoréfractifs, Pockels, Kerr, doublage de fréquence, mélange d'ondes, conjugaison de phase, ...), les semiconducteurs permettent aussi d'obtenir des effets importants dans des structures à puits quantiques ou super-réseaux. L'intérêt se porte vers le centre du spectre visible (alliages II-VI et I-VII), et vers l'utilisation de ces effets pour le traitement de l'information (calcul parallèle, traitement des images, ...) où les matériaux les plus utilisés sont des structures (III-V et II-VI) à puits quantiques, pour lesquelles la technologie est plus avancée et qui peuvent être

excitées au voisinage des résonances électroniques avec les lasers disponibles. L'ingénierie de la *structure de bandes d'énergie*, associée à celle des indices de réfraction, permettent la réalisation de fonctions optiques intégrées avec ces multicouches, associant laser, guides, coupleurs, détecteurs, ...

Les *solides ioniques* (oxydes, fluorures, ...) continuent à faire l'objet de recherches dans plusieurs domaines de l'optique. En ce qui concerne les *sources lasers*, l'introduction de terres rares (Ho, Tm, Er) vise à accroître la sélectivité de l'absorption par les tissus en médecine, à augmenter le rendement par pompage avec diodes laser (Nd, Er), à obtenir des sources accordables, notamment dans la région visible et UV. On peut noter aussi une tendance à la miniaturisation, grâce au pompage par des diodes et en développant des techniques d'épithaxie pour l'élaboration de couches minces d'oxydes ou de fluorures. Des matériaux du même type sont étudiés pour la détection (scintillateurs solides rapides, par exemple, LiF, BaF<sub>2</sub>) ou pour la photoréfractivité (BSO, BGO, ...). Par ailleurs, les *oxydes magnétiques* (ferrites et grenats) présentent des propriétés magnéto-optiques utilisables pour le *stockage optique* (disque réinscriptible), en compétition avec les alliages terre rare-métal de transition et les multicouches métalliques ultraminces. Le cas du niobate de lithium, et associés, mérite une mention à part car la possibilité de dopage et les propriétés non linéaires permettent la réalisation de sources (par dopage Nd) et de guides (par échange protonique) intégrant laser et doubleur de fréquence, par exemple.

Le *verre* reste un matériau de base en optique. Au-delà de l'amélioration des propriétés (transparence, indice de réfraction, ...), il faut citer l'introduction d'impuretés pour la fabrication de fibres : verres fluorés pour réduire les pertes aux longueurs d'onde supérieures à 1,5  $\mu\text{m}$ , dopage aux terres rares pour l'amplification : les fibres, dopées Er notamment, vont modifier considérablement les télécommunications optiques. La précipitation de nanosphères dans des verres sursaturés en semiconducteur (CdS, CdSe) permet d'obtenir des effets non linéaires intéressants liés aux dimensions quantiques de ces précipités.

Les *solides moléculaires* présentent un grand potentiel : transparence, forte non linéarité, bonne tenue mécanique et résistance aux dommages optiques. L'optimisation de leurs propriétés bénéficie des ressources de l'ingénierie moléculaire et de techniques d'élaboration simples. Une grande diversité de solides peut être créée, avec des organisations variées allant des cristaux aux polymères, La richesse des possibilités et les difficultés d'obtention de matériaux purs, stables et présentant les qualités attendues, ouvrent un large champ de recherches et beaucoup d'efforts sont encore nécessaires.

Il faut citer aussi les matériaux pour l'optique dont l'élaboration fait intervenir la lumière : photopolymères pour la fabrication d'hologrammes destinés à jouer un rôle important dans les systèmes optiques, incorporation de métaux par photodopage des chalcogénures amorphes (AsS, par exemple), d'intérêt pour l'optique diffractive dans l'infra-rouge,

Les *systèmes interférentiels multicouches* sont largement utilisés pour obtenir une fonction optique donnée (miroir, antireflet, filtre, ...) dans une bande spectrale prédéterminée. Au-delà de la diversification des matériaux, des techniques de dépôt plus performantes, on s'oriente vers des couches à variation continue de l'indice sur l'épaisseur (rugates), qui devraient permettre d'améliorer et de diversifier les fonctions optiques tout en supprimant les problèmes d'interface. Oxynitrures de Si, fluorures mixtes sont parmi les matériaux les plus étudiés.

Les *couches minces* sont aussi utilisées pour modifier les propriétés des surfaces, en combinant une fonction optique et d'autres fonctions, par exemple, faible absorption optique et grande conductibilité thermique, ou résistance mécanique élevée, furtivité dans l'infra-rouge, etc. Il s'agit de couches minces de diamant, d'oxydes transparents conducteurs, etc. Quant aux revêtements photochromes et électrochromes qui permettent de faire varier la transparence d'un vitrage en fonction de l'éclairement ou du champ électrique appliqué, ils se rattachent à la nouvelle classe de *matériaux adaptatifs*.

L'élaboration et l'étude de nouveaux matériaux accompagnent, depuis longtemps déjà, le développement de l'optique et de ses applications; la recherche de performances accrues, de nouvelles fonctions, de systèmes compacts et à haut rendement amène très souvent à des collaborations transversales entre physiciens et chimistes du solide, ingénieurs des procédés, opticiens et optoélectroniciens.

Les recherches en France, dans ce domaine, sont réalisées au CNRS, CNET, D-LETI/CEA et dans quelques laboratoires industriels. Certaines structures fédératrices ou de coordination existent (PIR-MAT, GDR, Programmes du MRT). Elles pourraient être renforcées pour exploiter les possibilités offertes en optique par les différentes classes de matériaux évoqués,

## FONCTIONS THERMO-MÉCANIQUES

Les propriétés des matériaux sont étroitement liées à leur structure à l'échelle nanoscopique, microscopique ou macroscopique. La maîtrise de ces structures nécessite une meilleure compréhension de la "genèse" des matériaux. Il faut également développer de nouvelles techniques de synthèse (précurseurs, techniques sol-gel...). Une production de matériaux modèles est également souhaitable afin de préciser les mécanismes responsables du comportement thermomécanique des matériaux, mais l'étude des matériaux réels, et plus particulièrement le rôle des défauts créés lors de la genèse, doivent être pris en compte. De ce point de vue, une caractérisation microstructurale à toutes les échelles (nano, micro, macro) est nécessaire. Enfin, le recyclage des matériaux usés ou l'élimination des déchets devront être pris en compte, du fait des exigences de plus en plus grandes de respect de l'environnement.



L'étude du *comportement thermomécanique* des matériaux nécessite une double démarche scientifique : d'une part établir des lois de comportement dans des conditions définies d'utilisation et d'environnement, d'autre part dégager les relations entre la microstructure et les propriétés d'emploi.

Le premier point nécessite le développement d'essais mécaniques représentatifs des sollicitations en service, permettant d'étudier des comportements complexes variés (couplages thermiques, métallurgiques). Le second point consiste à déduire, à partir de la réalité microhétérogène des matériaux et par les méthodes d'homogénéisation adaptées, leur comportement macroscopique global (passage micro-macro).

## 1 - MATÉRIAUX STRUCTURELS DE GRANDE DIFFUSION

La construction, le mobilier, les moyens de transports ou l'emballage utilisent des tonnages considérables de matériaux traditionnels pour des fonctions qui associent de plus en plus la tenue mécanique, l'amortissement ou l'isolation en même temps que l'aspect esthétique.

Sont concernés les matériaux d'origine minérale (bétons, céramiques, verres...), les matériaux naturels renouvelables (bois et dérivés, fibres naturelles, caoutchouc...), les métaux et alliages et les polymères techniques simples ou renforcés.

Les *défis scientifiques et techniques* des prochaines années sont doubles : d'une part, dépasser la notion de matériau pour concevoir des composants multifonctions qui améliorent la fiabilité, le confort et la souplesse d'utilisation au moindre coût, et d'autre part réduire - voire annuler - les impacts négatifs sur l'environnement de la fabrication massive, la mise en oeuvre et le recyclage de ces composants.

En ce qui concerne les *céramiques*, afin de réduire leur fragilité due à la présence de défauts de taille micronique, il est nécessaire d'*optimiser les*

*procédés de fabrication*, en utilisant des poudres fines et régulières, des conditions de mise en forme bien maîtrisées (pressage, coulage en barbotine, injection...). Un intérêt particulier devrait être porté au cas des cermets et céramiques pour outils de coupe. Les conditions d'usinage ou de préparation des surfaces des céramiques devraient également retenir l'attention, de nombreux domaines exigeant des états de surface particuliers (biocéramiques, fluorures ou verres fluorés lourds pour les nouveaux scintillateurs utilisés notamment en physique des hautes énergies). La caractérisation du comportement thermomécanique ainsi que l'étude des mécanismes microstructuraux responsables de ce comportement devront permettre une modélisation de ce comportement. L'élaboration des céramiques par la voie des polymères nécessite également de mieux cerner la structure souvent complexe des polymères et de mieux comprendre les mécanismes de céramisation. Parmi les enjeux, l'élaboration de nouveaux monomères, de nouveaux concepts de polymérisation, de polymères modèles d'études constitue un travail de fond. La question centrale reste la relation entre la structure du polymère précéramique et la structure de la céramique résultante.

## 2 - MATÉRIAUX COMPOSITES

Un effort concernant l'élaboration des fibres doit être entrepris, en particulier en ce qui concerne les fibres organiques à haut module ou les fibres céramiques ou de carbone utilisées comme renfort dans de nombreux composites. Le développement de préformes céramiques performantes pouvant supporter les opérations de mise en forme usuelles telles que l'imprégnation sous moyenne pression doit être encouragé.

Une bonne compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'élaboration des composites, en particulier des réactions entre fibre et matrice, est essentielle pour le contrôle des propriétés des composites dépendant de celles des interfaces. Une at-

tention particulière devra aussi être portée au traitement des fibres. Les lois de comportement et d'endommagement des matériaux composites, mal connues, nécessitent une attention particulière, en relation avec les événements locaux et la nature hétérogène des matériaux. La compréhension du délaminage, l'étude de la tenue au choc et à la fatigue doivent améliorer l'utilisation des matériaux composites. Un effort de modélisation doit être entrepris.

### 3 - NANOCOMPOSITES

Les propriétés des matériaux avec nanophases sont différentes de celles des matériaux polycristallins classiques du fait de leur taille de grains ultrafine et de leur grande fraction volumique interfaciale. On observe donc des changements importants au niveau de la frittabilité, densité, module élastique, dureté, résistance à la rupture et ténacité. Les *verres oxyazolés* présentent des propriétés remarquables au plan mécanique, et la présence d'azote induit une évolution des températures caractéristiques qui permet de contrôler la précipitation de nanophases dans la matrice vitreuse.

Les *céramiques nanophasées* frittent à des températures bien plus faibles que les céramiques usuelles et présentent des propriétés mécaniques nettement supérieures. On peut même obtenir des céramiques nanocomposites superplastiques à température ambiante. La fabrication de ces matériaux nécessite le développement de la synthèse de particules nanocomposites ayant une bonne frittabilité et pouvant se mettre en forme. La connaissance des mécanismes responsables du comportement de ces matériaux reste à préciser. Les nanocomposites peuvent être employés dans de nombreux, domaines tels que la coupe, les turbines à gaz, les pièces de frottement, les pièces de moteurs ou de réacteurs, l'électronique...

### 4 - MULTIMATÉRIAUX

On assiste à un développement du marché des multimatériaux qui permettent d'assurer la réalisation de fonctions multiples complexes sur une même pièce. C'est le cas de matériaux systèmes constitués d'association de feuilles comme les verres polymères (pare-brise, vitrages), les métaux polymères (emballages, tôles sandwich), les polymères-polymères (emballage). Une recherche se développe également dans le domaine des matériaux "intelligents" capables d'adapter leur réponse aux diverses sollicitations grâce à des fonctions capteur, activateur et éventuellement mémoire.

### 5 - TRAITEMENTS DE SURFACES ET TRIBOLOGIE

Les traitements de surface sont utilisés pour améliorer l'esthétique ou les performances d'un système. On peut ainsi améliorer les conditions d'assemblage (collage), résoudre de nombreux problèmes de frottement ou d'usure (tribologie), de résistance à un environnement corrosif (galvanisation, électrozingage). De nombreux traitements de surface peuvent être utilisés : traitements thermo-chimiques, CVD, PVD, implantation ionique, irradiation laser, dépôts plasmas... L'utilisation de revêtements durs pour résoudre de nombreux problèmes de frottement rencontrés dans les machines nécessite une collaboration entre mécaniciens et spécialistes de matériaux et du génie de leur élaboration, et une bonne détermination des propriétés thermomécaniques des revêtements et des contraintes internes.

Le développement de *films minces de diamant CVD* pour les outils de coupe constitue un enjeu industriel important. Les *matériaux composites céramique-céramique ou carbone-carbone* sont utilisés dans le spatial ou pour les avions hypersoniques susceptibles d'être soumis à des hautes températures et à des environnements sévères. Ces matériaux doivent être améliorés de façon à les

protéger grâce à des traitements anti-oxydation, anti-usure et autres pour leur conférer des propriétés particulières- Le traitement de surface *des verres* (couches minces) et des *cristaux* pour l'optique est également un sujet important en raison des nombreuses applications industrielles et du rôle prédominant des surfaces par rapport au volume pour des qualités optiques poussées.

## 6 - MATÉRIAUX ET ACOUSTIQUE

Les champs couverts par l'acoustique sont vastes et présentent de nombreuses interactions avec la science des matériaux. L'étude des matériaux, des interfaces par l'acoustique ultrasonore est largement répandue. Le développement de matériaux nouveaux pour l'acoustique (comportements, bases de données, standards d'essais) dans les domaines relevant des problèmes de réduction de bruit (matériaux absorbants, matériaux antivibratiles), est un enjeu important.

11 Faut également intensifier les travaux dans le domaine des matériaux (structures et systèmes) adaptatifs dits intelligents (c'est-à-dire sensibles et adaptables).

Pour l'ensemble de ces matériaux, la diffusion et la valorisation des recherches, en particulier en direction des PME/PMT est à privilégier. Un des moyens à mettre en œuvre est la constitution de banques de données et de normes. L'établissement de banques de données sur les matériaux en France ou en Europe n'est pas suffisamment avancé, et un besoin de coordination et de stimulation existe.

## CONCLUSION

Les matériaux avancés peuvent être considérés sous trois aspects :

- les matériaux avancés "chimiquement" qui ont une nouvelle composition chimique, avec des propriétés intrinsèques chimiques (réactionnelles cycliques/réversibles ou irréversibles) ou physiques nouvelles et excitantes;

- les matériaux avancés "technologiquement", avec de nouvelles propriétés liées au contrôle extrême de leur composition, de leur pureté et de leur micro structure, résultat de nouveaux procédés d'élaboration;

- les matériaux "physiquement" avancés, matériaux réellement créés par l'homme, parce que la nature ne les réalise pas dans les conditions habituelles, parce qu'ils ne sont pas compatibles avec les lois ordinaires de la thermodynamique.

Si le matériau du passé était, unifonctionnel, le matériau moderne doit posséder des propriétés associées; le matériau d'avenir est plutôt un système matériau multicomposés multifonctions. Enfin, le matériau de rêve, toujours multicomposés multifonctions, doit de plus être évolutif et adaptatif pour répondre de façon quasi autonome en temps réel à *des* situations non prévues.

Les progrès dans la synthèse des matériaux avancés ne peuvent être séparés de ceux réalisés en matière de contrôle et maîtrise de leur procédé d'élaboration, de leur mise en forme et de leur caractérisation. La mise au point de nouveaux précurseurs et l'emploi d'une méthodologie précise dans la conduite des recherches sont les clefs du succès. En conclusion, synthèse des matériaux, mesure et théorie constituent un tryptique de plus en plus indissociable en Sciences des Matériaux.

**Yves Laurent**  
Président du groupe 10



# 11

## LA CHIMIE : DE LA RÉACTION SIMPLE À LA SYNTHÈSE D'ÉDIFICES ÉLABORÉS

### INTRODUCTION

Comme l'indique son titre, ce chapitre est destiné à illustrer certains des aspects actuels de la chimie depuis **les bases physiques des transformations moléculaires** jusqu'aux **défis de la synthèse chimique**. Il ne sera pas le seul à traiter de cette discipline qui, comme d'autres, a ses problématiques propres mais qui sait aussi, par sa présence à certaines interfaces, entretenir de nombreuses relations pluridisciplinaires; l'approche moléculaire du chimiste permet alors souvent de faire progresser de manière nette la compréhension de phénomènes divers. De plus, les molécules nouvelles conçues et bâties par les chimistes rendent d'incalculables services dans les secteurs tant fondamentaux qu'appliqués, ce que la lecture d'autres chapitres démontrera abondamment.

La chimie est donc une science "carrefour" qui vit en symbiose avec nombre de disciplines et qui doit constamment évoluer, non seulement pour remplir son propre rôle socio-économique, mais aussi pour participer au mieux à des actions pluridisciplinaires fructueuses. Elle constitue, par

ailleurs, un secteur particulièrement vivant de la recherche qui s'appuie sur deux facteurs principaux :

- un **enseignement supérieur bien structuré** réparti entre l'Université (IUT et formation de 2ème cycle) et les écoles d'ingénieurs assurant toutes une formation de base de haut niveau. Celle-ci peut être complétée par une initiation à la recherche dans quelques 70 DEA diplômant chaque année environ 1500 étudiants (dont 30 % d'ingénieurs) qui poursuivent pour 60 à 65 % d'entre eux une formation complète dans le cadre d'une thèse. Dans le domaine des sciences "dures", la chimie est donc un secteur où un grand nombre d'étudiants entre dans la vie professionnelle avec le niveau de formation le plus élevé, sans grande difficulté dans la recherche du premier emploi malgré un fléchissement assez net de l'offre dans les deux dernières années;

- une **industrie dynamique** dont l'excédent commercial s'est très fortement accru en 1991 (+ 40 %) pour atteindre 24 milliards de francs grâce à des gains de parts de marché, notamment dans la CEE. Cet excédent accompagne une augmentation, de 1,7% du chiffre d'affaires (355 milliards de francs), supérieure à celle de ses concurrents européens, excepté l'Allemagne (+ 2,5 %). L'augmenta-

tion observée est malgré tout variable avec les secteurs, les points forts étant la pharmacie (+ 6,1 %), la chimie organique (+ 1,3 %) et la parachimie (produits ménagers, parfums) (+ 3,1 %).

Malgré ces deux facteurs favorables (enseignement et industrie), il apparaît que **l'image de la chimie** reste floue - et même souvent négative - non seulement dans l'esprit du grand public, mais aussi dans celui de spécialistes d'autres disciplines scientifiques. Ce phénomène international, ressenti comme une injustice par la communauté chimique, apparaît peut-être plus marqué en France qu'ailleurs. Pour cette raison, une (brève) partie de ce chapitre lui sera consacrée. Elle sera précédée d'une **analyse de quelques-uns des secteurs où la recherche récente est particulièrement active**. Le choix de ces secteurs n'a pas été aisé et il a été fait sur la base de deux principes :

- éviter la redondance avec des sujets abordés dans d'autres parties de ce rapport de conjoncture;

- montrer les diverses facettes de l'état de la science chimique, depuis l'étude des aspects les plus élémentaires de la réaction jusqu'aux phénomènes de reconnaissance intermoléculaire en passant par la synthèse d'édifices moléculaires complexes.

Pour chaque secteur, l'analyse des faits marquants (évolution et tendances) sera suivie de celle des forces et faiblesses du domaine et de l'inventaire de ses principales connexions interdisciplinaires. Ce plan, quelque peu systématique, aura malgré tout l'avantage de montrer la multiplicité des liens créés et entretenus par les chimistes pour répondre, au mieux de leur compétence, aux nombreux défis et problèmes qui leur sont constamment posés.

## LES BASES PHYSIQUES DES TRANSFORMATIONS MOLÉCULAIRES

La connaissance des mécanismes par lesquels deux espèces chimiques interagissent et se transforment pour conduire à la formation de nouvelles espèces constitue le point de convergence de toute la chimie.

Quelles sont les forces qui président au mouvement des électrons et des noyaux et induisent la formation ou la rupture de liaisons ? Comment décrire et contrôler l'accès à l'état de transition à partir duquel le système réactif évolue irréversiblement vers les produits ? Quels sont les processus précurseurs ou concurrents de la réaction : changement de géométrie, transfert de charge et d'énergie, réorganisation du milieu environnant ? Autant de questions qui sont à la base de la **compréhension de la réactivité chimique** et participent de façon fondamentale à l'unité de la science chimique.

Des progrès spectaculaires ont été réalisés dans ce domaine durant les 25 dernières années, en particulier dans le cas de **systèmes simples** et isolés (atome + molécule diatomique). De nombreux autres restent à accomplir pour comprendre les transformations de molécules complexes dans les conditions "réelles" de la matière (**phase condensée ordonnée ou désordonnée**). Une meilleure connaissance et un meilleur contrôle de la réactivité chimique reposent sur la conjugaison de plusieurs facteurs complémentaires.

- *Une relation étroite avec la théorie*

C'est la **mécanique quantique** qui a fourni les outils nécessaires à la compréhension détaillée et quantitative des phénomènes qui se produisent à l'échelle atomique. C'est donc dès le début des années 1930 qu'a débuté l'étude fondamentale de

la réaction chimique, avec les travaux théoriques de précurseurs tels que London, Eyring et M. Polanyi, Mais les énormes difficultés rencontrées dans les applications de la mécanique quantique à des systèmes contenant de nombreux électrons et quelques noyaux ont considérablement freiné cette étude et les rapides progrès enregistrés dans les vingt dernières années sont directement liés à la capacité de traiter de manière numérique des problèmes complexes.

Dans de nombreux cas, les lois de la mécanique classique suffisent à décrire simplement les échanges d'énergie et des moments au cours de la collision réactive. Ce sont également elles qui servent de base aux **calculs de dynamique moléculaire** permettant de décrire la réaction en milieu condensé. Plus encore, dans ce dernier *cas*, les progrès accomplis ont été conditionnés par le développement des moyens de calculs sur des ordinateurs de plus en plus puissants.

- *Une avancée des techniques et de l'instrumentation*

D'une manière analogue, la **cinétique chimique** par la mesure des vitesses de réaction avait depuis longtemps mis en évidence les barrières d'activation et l'existence d'effets stériques, mais pour aller au-delà, il fallait faire des études plus détaillées. Celles-ci furent possibles à partir des années 1960 grâce au développement des techniques de **jets moléculaires** et de détection d'atomes ou de molécules. Les **techniques lasers** ont encore accéléré ce développement, en fournissant des moyens nouveaux de préparation d'atomes ou de molécules. Plus récemment l'utilisation de lasers émettant de la lumière cohérente pendant une durée de quelques femtosecondes ("impulsions laser femtosecondes") a permis d'accéder aux échelles de temps caractéristiques de la réaction chimique. On remarque donc que, aussi bien du point de vue théorique que du point de vue expérimental, ce sont des progrès technologiques (laser, ordinateur...) qui ont permis l'expansion de ce domaine de recherche.

- *Une demande de la part d'autres secteurs scientifiques*

Outre l'intérêt fondamental de l'approche microscopique de la réactivité chimique, le **caractère interdisciplinaire** de ce domaine explique et justifie son développement. Plus précisément, le monde qui nous entoure est essentiellement basé sur des processus chimiques, et ce sont des réactions chimiques qui assurent toutes les fonctions essentielles de la vie (de la production d'énergie au traitement de l'information et à la mémoire). Il existe dans certains de ces processus une grande sélectivité dont la compréhension est une forte motivation. Par ailleurs, de nombreux autres travaux sont directement suscités par les besoins d'autres domaines de la Science. De la physique du milieu interstellaire ou atmosphérique à la biologie, les observations posent des problèmes de compréhension de processus chimiques.

## 1 - ASPECTS ÉLÉMENTAIRES DES RÉACTIONS CHIMIQUES : LA RÉACTION DÉCRITE COMME UN PHÉNOMÈNE COLLISIONNEL

La réaction chimique la plus élémentaire se produit souvent au cours de **la collision entre deux molécules** : durant cette collision, des liaisons chimiques se brisent et de nouvelles liaisons se forment. On peut donc considérer cette réaction bimoléculaire comme un problème de dynamique à l'échelle des atomes et l'analyser par les moyens expérimentaux et théoriques de la physique des collisions (développés en physique atomique et nucléaire). Des réactions unimoléculaires telles que la dissociation ou l'isomérisation peuvent aussi se produire dans une molécule isolée après le dépôt d'une énergie suffisante, par exemple par l'absorption d'un photon. Elles peuvent être étudiées par les mêmes méthodes.

La principale difficulté de ce domaine vient du **grand nombre de degrés de liberté** du système à



étudier : les premiers travaux, déjà anciens, sont naturellement tournés vers les petits systèmes, à trois ou quatre atomes. A l'heure actuelle, malgré leur apparente simplicité, les petits systèmes posent des problèmes très difficiles à régler et font encore l'objet de nombreuses études. Du point de vue théorique, le traitement du problème électronique par les méthodes de la chimie quantique et la dynamique quantique des noyaux n'est réalisé, au degré de précision souhaitée, que sur quelques systèmes modèles. Les expériences demandent une préparation très sélective des réactifs (contrôle de l'état interne, de l'énergie cinétique) et une caractérisation très sensible de l'état des produits de réaction qui sont réalisées grâce à l'utilisation de lasers de plus en plus performants. Les progrès les plus importants attendus dans ce domaine concernent le développement de l'étude, en temps réel, des réactions chimiques devenue possible par l'introduction des impulsions laser femtosecondes.

En pratique, rien n'interdit d'appliquer certaines de ces idées et de ces techniques à des gros systèmes, et les chercheurs ne s'en sont pas privés ! Il se révèle, en général, impossible d'en donner une description détaillée, les calculs théoriques reposant très largement sur l'usage de méthodes statistiques. La taille du système apparaît alors comme le paramètre essentiel : c'est par exemple le nombre d'atomes dans un agrégat, homogène ou non, à liaison métallique ou à liaison van der Waals. Il est alors possible de mesurer la dépendance de la probabilité de réaction avec la taille de l'agrégat.

## Evolution et tendances

Deux grandes tendances sont actuellement développées : l'étude de plus en plus détaillée et sélective de collisions réactives modèles sur des systèmes simples (à petit nombre d'atomes et si possible d'électrons) et l'évolution vers des systèmes complexes afin d'assurer la liaison avec les systèmes chimiques réels, en présence de leur environnement.

En ce qui concerne les systèmes simples, on observe tout d'abord une diversification des possibilités expérimentales par la recherche de nouveaux procédés de production des réactifs (vaporisation laser, photodissociation de molécules diatomiques, ...), par leur excitation éventuelle (électronique et/ou vibrationnelle) et par la mise au point de nouvelles méthodes de détection (fluorescence induite par laser, ionisation multiphotonique), éventuellement couplée à une imagerie optique. **Les complexes de van der Waals** offrent une solution élégante à la compréhension des mécanismes élémentaires dans les réactions chimiques. Ils permettent l'exploration de la surface de potentiel réactive ainsi que la mise en évidence des différents chemins réactionnels. Ces études sont en général accompagnées d'un traitement théorique complet, avec calcul des potentiels d'interaction et de la dynamique de collision (de plus en plus par des méthodes purement quantiques). L'étude des effets non-adiabatiques se généralise (saut de surfaces de potentiel, photodissociation de molécules tritomiques). Le récent développement des techniques de spectroscopie laser par impulsions femtosecondes permet d'accéder, **en temps réel**, à certains aspects de **la dissociation de molécules simples** (le mouvement relatif des particules par exemple) et devrait déboucher, à long terme, sur l'étude des complexes intermédiaires de collision.

Pour l'étude de systèmes plus gros et plus complexes, on essaie de mettre en œuvre les mêmes techniques de préparation des réactifs (refroidissement par détente supersonique, vaporisation par rayonnement laser) et de détection sélective des produits (ionisation résonnante multiphotonique). La caractérisation d'espèces instables (radicaux, atomes, ions, agrégats) entrant dans certaines réactions se fait par spectroscopie optique (UV, visible, IR).

De nombreuses questions restent ouvertes :

- mettre en évidence les complexes intermédiaires de réaction par spectroscopie femtoseconde dans de véritables expériences de collisions;

- produire par réaction chimique une inversion de population sur une transition électronique et créer ainsi un laser à pompage chimique dans le visible et l'UV;

- étudier la réactivité à ultra-basse température ( $T < 1$  mK) grâce au mécanisme de refroidissement des atomes par laser ou par l'utilisation de pièges à ions. Une nouvelle physique des collisions est attendue (lois quantiques de seuil);

- définir les conditions d'observation de collisions réactives assistées par laser (en champ fort) et tenter une expérience convaincante. L'objectif est ici d'ouvrir de nouveaux chemins réactifs et (éventuellement) de créer de nouveaux produits à haute valeur ajoutée (catalyse laser);

- comprendre les mécanismes successifs des interactions entre molécules simples et surfaces cristallines bien caractérisées, en particulier la photodésorption induite par rayonnement laser ou synchrotron et, à plus long terme, la réactivité chimique de molécules individuelles à l'aide du microscope à effet tunnel.

## Forces et faiblesses

À l'interface de la Physique et de la Chimie, la communauté française de dynamique réactionnelle a été créée en 1979, à l'initiative du CNRS, avec un double objectif : appliquer les techniques et méthodes issues des disciplines voisines et promouvoir une forte collaboration entre théorie et expérience. La communauté, regroupée au sein d'un GDR, compte des chercheurs issus de diverses disciplines : physique atomique et moléculaire, physique des collisions, chimie physique et chimie quantique.

En taille, la communauté française est comparable à celle de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne, historiquement les plus anciennes en Europe. Elle est suffisante pour assurer le renouvellement continu des hommes et des idées, par l'intermédiaire de plusieurs enseignements de

DEA et par la présence de nombreux étudiants en thèse dans les laboratoires, la communauté européenne est comparable à celle des Etats-Unis.

La communauté française est présente dans la plupart des domaines concernés par la dynamique réactionnelle; elle se distingue par une approche originale de la réactivité basée sur l'étude des complexes de van der Waals et par le développement des méthodes théoriques (calculs hémiquantiques et quantiques de la dynamique de collision),

Il est impératif de continuer l'effort entrepris par le CNRS : la simplicité des conditions expérimentales qui est recherchée impose une complexité technologique de plus en plus lourde et onéreuse (chimie femtoseconde par exemple), de même les calculs de chimie quantique concernent des systèmes de plus en plus complexes. Il faut donc veiller à ce que **la communauté reste compétitive en lui donnant les moyens techniques et financiers nécessaires-**

## Rencontres avec les disciplines voisines

Plusieurs disciplines sont intéressées par les aspects fondamentaux de la recherche développée en dynamique réactionnelle ;

- la physique des gaz quantiques denses (collisions à ultra-basse température);

- la physique de l'atmosphère, avec les problèmes de pollution, de fabrication-accumulation de gaz carbonique (étude physico-chimique de la combustion), de destruction de la couche d'ozone;

- la technologie hypersonique, avec l'étude de réactions se produisant dans les ondes de chocs ou sur la surface de véhicules spatiaux, la technologie de gravure micro-électronique avec l'étude des réactions de surface (éventuellement assistées par laser);

- la physico-chimie interstellaire, avec la caractérisation du milieu par spectroscopie et la com-

préhension des équilibres chimiques (présence de barrières de réaction, existence de complexes intermédiaires, mesure de constantes de vitesse à très basse température, identification des processus de photoionisation et de photodissociation);

- l'astrochimie occupe une place particulière dans la communauté française. En effet, la disponibilité de nouveaux radiotélescopes a permis la détection de nombreuses molécules "extra-terrestres" constituées d'hydrogène, de carbone, d'oxygène et d'azote ainsi que des molécules polyaromatiques. La formation de ces molécules est due à une chimie "complexe"<sup>11</sup> qui se produit dans les conditions particulières régnant dans les nuages ou à la surface des grains interstellaires. Les méthodes de la dynamique réactionnelle permettent une meilleure compréhension de ces réactions "exotiques";

- la géophysique d'effet isotopique en tant que traceur);

- la métallurgie, avec l'étude des réactions d'oxydation de métaux réfractaires (plasmas chimiques).

## 2 - SOLVATION ET AGRÉGATS

Les propriétés physiques et chimiques des molécules sont grandement influencées par leur environnement. Cet environnement peut, par exemple, modifier les propriétés électroniques, en changeant la position d'un état par rapport à un autre, stabiliser les charges électriques et les séparer. Ces mêmes effets sont aussi responsables de la différence de réactivité entre les molécules en phase gazeuse et en phase liquide, le solvant ayant pour rôle d'abaisser les barrières de potentiel.

La compréhension des phénomènes de solvation est délicate car de nombreux paramètres interviennent dans ces processus :

- la nature du solvant et ses propriétés moléculaires;

- le nombre de molécules réellement impliquées dans le processus et, en particulier, le rôle de la première couche de solvant et celui des molécules plus éloignées;

- la répartition (localisation, séparation) des charges et les changements de structure qui lui sont associés;

- l'échelle de temps de la réaction de solvation. Ce temps dépend à la fois du temps de polarisation des molécules de solvant et de leur temps de réorientation;

- les mécanismes de transfert d'énergie dans un ensemble limité. Par exemple, quelle est la taille critique d'un système qui permet d'observer des transformations de phase ?

## Evolution et tendances

Le développement de nouvelles techniques expérimentales ainsi que l'amélioration des méthodes de calcul permettent d'aborder le problème de la solvation, phénomène macroscopique, par l'étude d'espèces microscopiques.

**Les agrégats moléculaires** sont des ensembles de molécules **intermédiaires entre l'état gazeux et l'état condensé** (solide ou liquide). Ce sont des systèmes modèles permettant d'étudier de manière Fondamentale les effets de solvant (réaction chimique, catalyse).

**Les agrégats métalliques** sont des **assemblages d'atomes** qui constituent des structures intermédiaires entre atomes individualisés et solides et permettent de comprendre la restructuration électronique lors du passage de l'atome à l'état condensé.

Les techniques expérimentales développées ces dernières années devraient apporter de nombreuses informations car elles permettent, en particulier, de décomposer une à une les étapes de la solvation, Les techniques de jet moléculaire per-



mettent de former des agrégats libres dans lesquels le nombre d'atomes ou de molécules est variable. Ceci permet soit de suivre la réactivité d'une molécule en fonction du nombre de molécules de solvant qui l'entourent, soit d'évaluer la réactivité d'un agrégat métallique en fonction de sa taille.

**Les techniques impulsionnelles ultrarapides** de photolyse laser ou de radiolyse puisée (pico et femto secondes) permettent de suivre l'évolution temporelle des systèmes, d'observer les intermédiaires réactionnels et d'analyser, par exemple, chaque étape d'une solvation ainsi que le rôle de chaque intermédiaire sur la réaction. Parmi les résultats récents, signalons la mise en évidence de l'électron solvaté, l'étude de réactions de substitution et la mise en évidence de réarrangements moléculaires.

Les interactions des agrégats avec la matière (solide, gaz, plasma) sont également un domaine de recherche nouveau.

Déposés en couches minces sur des surfaces solides ils peuvent induire une réactivité nouvelle (catalyse). Ils sont caractérisés par évaporation puis ionisation.

Ils peuvent être utilisés comme projectiles pour bombarder des surfaces. Les recherches autour de ces réactions ont pour motivation l'étude du dépôt d'énergie dans la matière, son transfert dans le milieu et sa dissipation en liaison, par exemple, avec des aspects théoriques d'onde de compression induite.

L'interprétation de ces résultats passe obligatoirement par un effort de **modélisation** (structure des agrégats, dynamique moléculaire et réactionnelle...) de ces systèmes.

Depuis une dizaine d'années, les théoriciens de la chimie essaient de tenir compte des effets de solvation dans leurs calculs, afin de se rapprocher le plus possible des phénomènes expérimentaux qu'ils veulent interpréter. C'est le cas, pour des raisons évidentes, de tout ce qui a trait à la chimie or-

ganique physique (propriétés de basicité par exemple) ou la photochimie (études des colorants) et, bien entendu, à la biologie moléculaire où l'eau est essentielle.

Si on se place d'un point de vue tout à fait général, celui de l'état liquide, on a affaire à un problème à N corps. Pour le résoudre il faudrait, en principe, tenir compte de toutes les forces (inter comme intra-moléculaires) qui interviennent et soumettre les molécules en présence à un traitement statistique. Il est clair qu'une solution du problème ainsi posé passe par une modélisation énergétique du système considéré. Or, celui-ci dépend lourdement de l'objectif que Ton se donne : calculs d'énergie libre, de propriétés spectroscopiques, de constantes thermodynamiques.

On peut distinguer deux types principaux d'approche pour les agrégats moléculaires :

- le premier consiste en un traitement statistique d'un "liquide vrai" composé de "molécules-modèles". Il s'agit alors de prédire par calcul les propriétés thermodynamiques d'un liquide composé de plusieurs centaines de molécules;

- le deuxième type d'approche consiste en un traitement classique ou quantique d'une "molécule vraie" plongée dans un "liquide modèle", à savoir un milieu homogène de constante diélectrique donnée dans lequel on a creusé une cavité.

Des simulations sur des systèmes de plus en plus complexes dépendront de l'augmentation des puissances de calcul sur ordinateur.

En ce qui concerne les agrégats métalliques, plusieurs approches existent, qui utilisent soit une approche quantique, soit des modèles plus globaux déjà utilisés en physique nucléaire.

## Forces et faiblesses

L'étude, à l'état microscopique, de la solvation ou, de façon plus générale, celle des agrégats

métalliques ou moléculaires est un sujet en plein essor. Plusieurs équipes françaises performantes s'intéressent déjà à ces problèmes et ont obtenu des résultats très prometteurs. Elles devraient continuer à se situer au meilleur niveau dans les années qui viennent. Il existe déjà un groupement scientifique sur le thème "agrégats". Le lien avec la réactivité en solution devrait être assuré par la création d'un nouveau groupement de recherche intitulé "acte chimique élémentaire en phase liquide".

## Rencontres interdisciplinaires

**Le problème de la solvation se situe d'entrée à l'interface entre la chimie et la physique.** C'est un domaine charnière entre la dynamique réactionnelle des systèmes isolés et la réactivité des espèces en solution.

A terme, les résultats de ces études devraient déboucher sur une meilleure compréhension de la catalyse et des réactions biologiques.

Le mode de formation et la réactivité des agrégats "artificiels" peuvent donner des idées sur les réactions intervenant en astrophysique. L'étude de molécules faiblement solvatées montrera peut-être une réactivité anormale interférant avec des problèmes d'environnement.

### 3 - APPROCHES MACROSCOPIQUES DE LA RÉACTIVITÉ EN SOLUTION : LA RÉACTION VUE DANS SA GLOBALITÉ

La réaction chimique, telle qu'elle est pratiquée en synthèse, implique des systèmes chimiques complexes (réactifs, solvant, catalyseur,...) difficiles à définir d'un point de vue microscopique en raison de leur nombre de degrés de liberté.

Cependant la compréhension à un niveau moléculaire du déroulement de la réaction, le pourquoi et le comment de sa sélectivité, représentent

un enjeu considérable pour le contrôle et la maîtrise des grandes réactions de la chimie. Actuellement, malgré l'immense savoir-faire des chimistes de synthèse, il est encore trop difficile d'éviter la formation de sous-produits indésirables, l'emploi d'un solvant non recyclable, l'empoisonnement d'un catalyseur..., toutes choses qui, d'un point de vue économique et environnemental, sont toujours trop coûteuses.

L'approche macroscopique de la réaction consiste à établir un mécanisme, c'est-à-dire une description énergétique et structurale du chemin réactionnel emprunté par le système pour aller des réactifs aux produits. Il en résulte une connaissance physicochimique intime de la réaction qui permet d'aborder la recherche des conditions optimales et des possibilités d'activation et de contrôle d'une transformation chimique,

## Evolution et tendances

L'une des problématiques actuelles dans l'étude des mécanismes de réaction est celle de **l'existence ou non d'intermédiaires réactionnels hautement transitoires sur le chemin réactionnel**. En d'autres termes, la rupture d'une liaison est-elle concertée avec la formation d'une autre, ou encore les processus de transferts électroniques et de rupture et formation de liaisons sont-ils couplés ou séquentiels ? L'enjeu est important en synthèse dans la mesure où une réaction passant par un intermédiaire relativement stable est généralement peu sélective puisque ce dernier a le temps de se réarranger avant de réagir sélectivement avec l'espèce chimique choisie.

Les méthodes anciennes qui consistent à geler ces intermédiaires en matrices à basse température sont toujours utiles. Par ailleurs **les techniques spectroscopiques** aujourd'hui presque **classiques de photolyse éclair, de laser nanoseconde, de T-jump laser** constituent des outils indispensables à la caractérisation énergétique et structurale d'intermédiaires de courte durée de vie (de la nanoseconde à la picoseconde). Complé-

mentaire de ces outils adaptés seulement à des espèces chimiques présentant des chromophores puissants, une technique électrochimique très rapide a vu le jour très récemment. Il s'agit du développement d'une méthode non conventionnelle fondée sur la mise en œuvre d'ultramicroélectrodes (quelques microns) permettant de mesurer des constantes de vitesse proches de la vitesse limite de diffusion ou dans des milieux fortement résistifs. Cette technique est particulièrement adaptée au suivi d'espèces organométalliques transitoires impliquées dans des cycles catalytiques à des concentrations aussi faibles que  $10^{-4}$  M. D'autre part, une nouvelle génération **d'horloges radicalaires** à très haute résolution temporelle qui utilise des radicaux sulfonylés a été élaborée. Ces horloges sont utilisées pour explorer les transferts mono et biélectroniques entre des anions carbonés et des espèces électrophiles ou des composés polyhalogénés déposés sur des surfaces métalliques.

À côté de la décomposition d'une réaction en étapes élémentaires, la prise en compte du rôle du solvant n'a été explorée de façon systématique que pour quelques exemples : les substitutions nucléophiles sur les liaisons carbone-groupe partant et la très célèbre réaction de Mentschukin (formation d'halogénure d'ammonium quaternaire à partir d'un halogénure d'alkyle et d'une amine) qui sont des réactions excessivement lentes ainsi que la réaction ultrarapide de formation d'ions par addition électrophile d'halogènes sur un éthylénique. La variété des rôles du solvant, à la fois spectateur et partenaire que l'approche macroscopique met en lumière, ainsi que la détermination précise de son influence sur la barrière cinétique, est maintenant abordée par **les techniques de simulation statistique**.

Dans le même contexte, le découplage entre réorganisation des liaisons et progression de la solvation lors de l'ionisation des acides carbonés qui a été particulièrement étudiée récemment manifeste la complexité des relations entre la barrière cinétique et la force motrice thermodynamique des réactions.

Les approches expérimentales sont souvent couplées à une approche théorique. La théorie des orbitales frontières, fondée sur la nature orbitale de la liaison chimique, a connu des développements particulièrement riches dans ses applications à la réactivité chimique. Il est indéniable qu'aujourd'hui cet aspect appliqué de la théorie, associé aux modélisations moléculaires de toute nature, est devenu un outil presque banal pour la plupart de ceux qui envisagent la réaction chimique macroscopiquement. L'élargissement du champ d'action de cette méthodologie de la chimie organique à la chimie organométallique et à des réactions mettant en jeu des transferts de charge sont des succès récents qu'il convient de signaler.

La mise en œuvre de méthodes *ab initio* pour comprendre et analyser la réactivité de systèmes complexes est encore peu répandue pour diverses raisons, parmi lesquelles la lourdeur des calculs de molécules à grand nombre d'atomes et surtout la difficulté de prendre en compte le solvant. A cet égard, **le couplage de la chimie quantique aux méthodes statistiques** adaptées à des systèmes comportant plusieurs centaines de molécules en interaction ouvrent des perspectives que les expérimentateurs de la réactivité en phase liquide et en solution surveillent avec intérêt.

La jonction entre approches macroscopique et microscopique de la réactivité fait également partie des ambitions récentes, même si les difficultés à surmonter restent grandes puisque les domaines d'application de chaque approche, échanges énergétiques entre niveaux électroniques pour les uns, barrière d'origine thermique pour les autres, ne se recouvrent pas nécessairement.

## Forces et faiblesses

A l'interface de la physicochimie et de la synthèse, les études de la réactivité en solution réalisées en France sont d'un niveau très élevé. Elles sont le fait d'une dizaine de petites équipes totalement insérées dans la communauté internationale dont elles sont actuellement l'un des moteurs.



Toutes ces équipes, qui entretiennent des relations suivies entre elles, appartiennent à des formations associées au CNRS qui leur apporte un soutien essentiel.

Le dynamisme de ces équipes et l'originalité de leurs résultats proviennent en particulier d'une volonté soutenue d'ouverture vers les deux pôles, physicochimie de la réactivité et synthèse, qu'elles ont vocation d'associer. Cependant, il faut reconnaître que ce thème n'est pas une spécialité française et que les pays anglosaxons, les Japonais et même les Italiens y consacrent des forces plus importantes. Il est remarquable en particulier que dans ces pays il n'y ait pas de césure entre physicochimistes de la réactivité et synthèse, et qu'au sein des mêmes équipes, ces deux volets complémentaires de la science chimique soient souvent développés en parfaite harmonie. En France, du fait du trop petit nombre d'équipes bicompetentes, la jonction n'est assurée que ponctuellement. Néanmoins, des progrès décisifs, aussi bien pour le développement des concepts de base de la synthèse que pour la finalisation de la compréhension de la transformation chimique, pourraient être obtenus plus rapidement et à moindre frais si cette jonction était réalisée. Dans ce contexte, le décroisement de l'enseignement universitaire français qui, sous sa forme actuelle, conduit à une ignorance réciproque des objectifs et des cultures de base de la synthèse et de la physicochimie de la réactivité devient impératif.

## Rencontres avec les disciplines voisines

Le champ d'application des études de réactivité, centré pendant longtemps sur les grandes réactions de la chimie organique, s'étend maintenant à la chimie organométallique et à la chimie des processus biologiques.

En chimie organométallique, des résultats quantitatifs précis sur la réactivité d'intermédiaires fugaces impliqués dans des *cycles* catalytiques sont maintenant accessibles grâce aux techniques électrocinétiques. Des processus d'activation de ruptu

re et de formation de liaison par transferts électroniques dans les sphères de coordination de métaux ont été élucidés au niveau moléculaire. En particulier, les carboxylations d'halogénures aromatiques catalysées par le nickel ou le palladium, les substitutions réductrices ou oxydantes de ligands du manganèse, les activations de substitutions nucléophiles aromatiques par complexation avec les métaux carbonyles sont des réactions d'intérêt synthétique dont le déroulement intime et les paramètres physicochimiques énergétiques et structuraux, sont décrits avec un degré de précision très fin.

Pour les systèmes biologiques, il convient de signaler le foisonnement des travaux actuels dans le domaine très complexe des mécanismes. Ceux-ci constituent un défrichage préliminaire essentiel à la compréhension physique de leur réactivité et hissent espérer qu'un niveau de description satisfaisant sera atteint dans un avenir proche. Parmi toutes les études mises en chantier, on peut distinguer deux grandes tendances. Les unes envisagent essentiellement les mécanismes de fonctionnement des enzymes, telles que des déshydrogénases, des carboxylases et décarboxylases, des aldolases, etc. Dans certains cas, les résultats sont déjà suffisamment élaborés pour permettre de séparer la part due à la reconnaissance moléculaire (facteurs structuraux et thermodynamiques) de celle due à la réactivité chimique proprement dite. Les autres sont focalisées sur les ruptures photosensibilisées de TAON et sur les rôles respectifs des radicaux, de l'anion superoxyde et de l'oxygène activé dans ces coupures.

## LES DEFIS DE LA SYNTHESE CHIMIQUE

La première partie de ce chapitre a traité de l'étude des mécanismes réactionnels et des divers paramètres régissant la rupture et la formation des liaisons d'une molécule mise dans un milieu qui provoque ces transformations. On a pu y voir que

l'utilisation de méthodes de plus en plus affinées permettaient des avancées notables dans la connaissance des phénomènes dont l'ensemble constitue une réaction.

Cette connaissance accrue a pour conséquence une amélioration incessante des procédés de synthèse ou une prévision plus sûre de la nature des produits des réactions. A l'inverse aussi, la découverte d'une réactivité inattendue, ou celle d'un produit aux propriétés imprévues, peut ouvrir la porte à des hypothèses novatrices permettant de mieux définir certains aspects du déroulement d'un processus chimique.

Il y a donc une parfaite complémentarité entre les deux pôles de la science chimique, l'un permettant de prévoir et d'expliquer, l'autre de produire de nouvelles molécules, de nouveaux édifices, en un mot de nouveaux objets qui trouveront leur utilisation sur le plan économique. Cette deuxième partie sera consacrée aux défis de la synthèse : ils sont nombreux, tant la demande est forte pour ces nouveaux objets qui font (ou feront) partie de la vie quotidienne. Seuls quelques aspects particulièrement importants seront dégagés ci-dessous, le caractère économiquement utile des produits de la synthèse étant plus particulièrement exposé dans d'autres chapitres de ce rapport (matériaux, médicaments, etc.).

## 1 - HÉTÉROÉLÉMENTS ET CHIMIE ORGANOMÉTALLIQUE

Si la synthèse de nouveaux édifices reste une activité fondamentale de l'hétérochimie et de la Chimie Organométallique, l'utilisation de ces techniques dans divers domaines est en passe de supplanter les études structurales fondamentales qui avaient la primeur des chimistes voici quelques années. On assiste maintenant en effet à une multiplication d'études de réactivité et de définitions de nouveaux procédés de synthèse, basés sur ces disciplines, susceptibles d'être utilisables pour la synthèse asymétrique, la catalyse, la préparation de ré-

actifs originaux ou l'élaboration de nouveaux matériaux.

## Evolution et tendances

L'activation de petites molécules ( $H_2$ ,  $CO_2$ , alcènes, alcynes, alcanes, ...) par les complexes métalliques pour obtenir des synthèses originales dans la sphère de coordination d'un métal reste un objectif important pour la communauté des chimistes organométalliciens. Le problème de l'**activation** et surtout de la **fonctionnalisation** ultérieure des **liaisons C-H et C-C des hydrocarbures** n'a pas reçu de solution satisfaisante malgré la multiplication de ce type d'études au cours des années 80. Le problème de l'oxydation sélective de substrats organiques par des voies non-biomimétiques est un problème fondamental qui est d'autant plus d'actualité que très peu d'équipes françaises s'y consacrent actuellement; l'utilisation de l'oxygène moléculaire pour ces réactions fait partie des défis majeurs de la discipline qui n'ont pas encore été relevés avec succès.

Sur les 528 médicaments chiraux de synthèse mis actuellement sur le marché, moins de 12 % sont proposés optiquement purs au public. Les deux voies d'accès à la pureté optique - synthèse énantiosélective par catalyse asymétrique ou dédoublement du racémique - sont à encourager. L'emploi de phosphines ou d'aminés asymétriques dans le domaine de la catalyse (d'hydrogénation, d'hydroformylation, de cyclopropanation, ...) pourrait apporter des solutions élégantes à ces problèmes.

Dans le domaine de la synthèse multi-étape, l'utilisation de réactions organométalliques ou d'hétéroéléments pourrait jouer un rôle important en permettant de limiter le nombre des réactions.

La croissance quasi exponentielle, ces dernières années, des études consacrées à la synthèse de nouveaux systèmes insaturés comportant un ou plusieurs éléments principaux (B, Si, Ge, P) devrait déboucher sur la mise au point de synthèses originales et la découverte de **nouveaux réactifs or-**

**ganométalliques.** Bien que les espèces dites à basse coordinence n'aient pas conduit pour le moment à des applications spectaculaires, l'étude de leur réactivité doit être poursuivie. Dans ce domaine, l'association hétéroélément-chimie organométallique des métaux de transition est particulièrement féconde et devrait à terme aboutir à une chimie originale dans la sphère de coordination du métal.

Les métaux de transition sont parmi les plus utilisés par les chimistes "inorganiciens", en particulier ceux des groupes 8 à 10. On peut noter plusieurs percées spectaculaires avec les lanthanides. Quelques études avec les actinides ou les métaux du groupe 4 ont été réalisées qui méritent d'être encouragées. L'utilisation de clusters ou agrégats métalliques, dont la synthèse semble maîtrisée, pour promouvoir la formation de liaisons carbone-carbone ou carbone-hétéroatome devrait se développer au cours des prochaines années.

La recherche de **nouveaux matériaux** connaît un développement spectaculaire. L'hétérochimie et la chimie organométallique y occupent une place de choix, les recherches étant plus particulièrement centrées vers la synthèse de précurseurs de polymères solubles et fusibles pour l'obtention de matériaux du type nitrure de silicium, de bore ou d'aluminium. Une meilleure connaissance de ces précurseurs (nature, composition, structure) devrait avoir des retombées pour la mise au point de la préparation de céramiques ternaires et autres céramiques composites, l'un des objectifs étant l'obtention de matériaux homogènes.

Les polymères inorganiques possèdent un ensemble de propriétés que l'on retrouve rarement dans les polymères organiques (flexibilité, résistance au feu et à l'hydrolyse, insensibilité aux acides et aux bases, tenue aux solvants, etc.). Certains de ces polymères, tels que les polyorganophosphazènes, sont très étudiés.

## Forces et faiblesses et rencontres interdisciplinaires

Une des forces de ces disciplines tient au fait qu'elles sont abordées par des chercheurs de culture complémentaire animés d'objectifs différents. On retrouve ainsi de nombreux laboratoires français très actifs dans l'application de l'hétérochimie ou de la chimie organométallique dans les branches principales de la Chimie : Organique, Inorganique, Matériaux, Supramoléculaire, Coordination, etc. Le réseau de laboratoires ainsi défini est assez dense et se situe à un niveau plus qu'honorable en Europe.

Un point fort des laboratoires français actifs dans le domaine de l'hétérochimie réside dans la mise au point et l'étude de la réactivité des composés des **éléments principaux dits à coordinence non usuelle**. La reconnaissance internationale au niveau de l'ensemble de la discipline s'est traduite récemment par l'attribution de prix internationaux et nationaux à des chercheurs du CNRS et de l'Université et par la tenue, en 1992, de deux congrès internationaux en France concernant la chimie du soufre et celle du phosphore.

On peut noter que la masse critique de chercheurs se consacrant aux problèmes de catalyse homogène n'est pas encore atteinte. Il conviendrait par ailleurs d'encourager davantage les travaux concernant la synthèse asymétrique. Les interactions avec la chimie du solide sont pour le moment trop peu développées, et on peut également regretter que la chimie organométallique ne soit présente que de façon très marginale dans les laboratoires industriels français, vraisemblablement en raison du caractère fondamental de cette discipline qui se situe en amont des problèmes de synthèse. Il est donc de la responsabilité du CNRS et de l'Université de poursuivre le renforcement entrepris eu égard aux progrès potentiels que ce domaine peut apporter dans la définition de nouveaux procédés de synthèse, en chimie fine notamment. La création récente d'un club ECRIN Hétérochimie va dans la bonne direction : elle permettra le rapprochement entre secteur public et



privé qui devraient y trouver les idées et les hommes permettant une progression rapide de la discipline.

## 2 - SYNTHÈSE DU SOLIDE, PRÉCURSEURS, MISE EN ŒUVRE, TRANSFORMATIONS

Pendant longtemps la chimie du solide s'est plus préoccupée de l'établissement de relations structure-propriétés physiques pour *des* solides obtenus à haute température, que de problèmes de réactivité ou de mise en forme. Fort heureusement de nombreux laboratoires français ont contribué à révolution de cette situation en développant la **chimie douce**. Ils permettent à notre pays d'occuper, avec les Etats-Unis et le Japon, l'une des premières places dans ce domaine.

Cette chimie met en oeuvre des précurseurs moléculaires pour l'obtention de cristaux moléculaires, de verres et céramiques ou pour le dépôt de couches minces et des précurseurs solides sur lesquels sont effectués une chimie modificative : intercalation-désintercalation, échange ionique, greffage de fonctions ou de "piliers" organiques (*pillaring*) sur des composés ou des feuillets minéraux.

### Evolution et tendances

#### A - Précurseurs

##### *Electrocristallisation et cristaux moléculaires*

L'association, par la méthode électrochimique, d'ions radicaux moléculaires organiques ou organométalliques à des ions minéraux moléculaires issus de la chimie des oxydes, des halogénures, des chalcogénures et chalcobalogénures dont on sait en particulier moduler la taille, la forme, la charge, la structure électronique (induction et stabilisation

d'une grande variété de multiplicités de spins au sein d'orbitales frontières à caractère dp-pp prononcé) s'avère d'une grande versatilité synthétique, et sa mise en œuvre pour l'obtention d'assemblées moléculaires organisées, déjà très perceptible, doit être encouragée. En particulier, le caractère sélectif de l'électrodéposition vis-à-vis de l'obtention d'une stoechiométrie unique - alors que d'autres méthodes (par transfert de charge ou coprécipitation, par exemple) favorisent l'obtention de mélanges de phases - associé à la production de monocristaux, de grande pureté et faible taux de défauts chimiques et structuraux constituent des atouts qui justifient une mise en œuvre accrue de cette méthode.

De nombreuses questions restent ouvertes. Elles touchent à la fois au traitement thermodynamique, à la modélisation des mécanismes d'électrocristallisation ainsi qu'à une approche expérimentale exhaustive, jusqu'ici largement délaissée, du rôle de la nature de l'électrode.

Plusieurs thèmes sont actuellement en émergence, Il s'agit de :

- l'identification de principes de constructions de solides moléculaires organisés par emboîtement de gros ions ; directionnalité des interactions intermoléculaires, identification et modélisation de types structuraux, rôle des liaisons hydrogène dans l'anticipation du site d'un ion moléculaire;

- l'apport des méthodes de voltamétrie cyclique couches minces à l'identification d'états de valence mixtes et la prédiction des stœchiométries associées. Exploration et développement des méthodes d'électrocristallisation à potentiel contrôlé;

- la synthèse et manipulation d'objets moléculaires associant plusieurs fonctionnalités rédox, non-nécessairement coplanaires, nouveaux systèmes rédox (en particulier en chimie du phosphore), polymérisation organique-inorganique (couplages dp-pp); .

- l'électrosynthèse de solides organisés au sein de liquides structurés (mésophases).

## *Elaboration de verres et céramiques par le procédé sol-gel*

Depuis une dizaine d'années, l'utilisation de précurseurs moléculaires pour préparer des verres et céramiques met en lumière l'importance de la chimie dans le domaine de l'élaboration des matériaux. Cette voie de synthèse connaît aujourd'hui un développement important, comme en témoignent les deux congrès internationaux qui se tiennent tous les ans sur ce sujet ainsi que les nombreuses sessions qui lui sont consacrées dans les congrès classiques sur les céramiques et les verres.

L'idée de base consiste à construire progressivement le réseau par des réactions de polymérisation inorganique. En plus de son caractère "chimie douce", les principaux avantages de cette méthode sont :

- la possibilité de contrôler "chimiquement" l'ensemble de la filière allant du précurseur au matériau et de synthétiser ainsi des matériaux sur mesure;
- le mélange des précurseurs à l'échelle moléculaire qui permet d'obtenir des matériaux très homogènes et de contrôler leur "nanostructure";
- l'association de la chimie organique et inorganique qui permet d'élaborer des matériaux hybrides, les "organo-céramiques", formés d'un double réseau minéral et organique;
- la formation de phases de plus en plus condensées qui conduit à des "gels" ou des "sols" dont la viscosité est particulièrement bien adaptée à des opérations de mise en forme à température ambiante : étirage de fibres par extrusion, dépôt de films par trempage (*dip-coating*).

Deux procédés peuvent être regroupés dans cette voie "précurseurs moléculaires" :

- le procédé **sol-gel** qui met en œuvre l'hydrolyse et la condensation en solution de précurseurs tels que les alcoxydes  $M(OR)_n$ . Il faut leur as-

socier toutes les techniques de précipitation ou coprécipitation en phase aqueuse. Le développement le plus important se manifeste aujourd'hui dans le domaine des films minces (revêtements sur vitrages, optique sol-gel);

- le procédé connu sous le nom de "**Yajima**" qui part de composés organométalliques du silicium. On réalise tout d'abord la polymérisation d'un polycarbosilane que l'on pyrolyse ensuite afin d'obtenir un carbure de silicium. Le passage par une étape polymère permet, par exemple, d'étirer des fibres que l'on céramise par pyrolyse.

Dans tous ces procédés, l'accent est mis sur le contrôle chimique des opérations et les relations existant entre la structure moléculaire du précurseur et les caractéristiques du verre ou de la céramique.

## *CVD, OMCVD et plasma*

La croissance de couches minces par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est actuellement une méthode de choix mise en œuvre dans un grand nombre de technologies modernes couvrant un large domaine : microélectronique, électronique, optique, mécanique, thermomécanique, traitement de surface, tribologie, décoration... L'abaissement des températures de dépôt peut être obtenu par OMCVD (utilisation de précurseurs pyrolysables pour épitaxie) ou par CVD assisté plasma (dissociation des précurseurs par application d'un champ électrique haute fréquence ou micro-onde).

Utilisée tout d'abord dans le domaine de la microélectronique, cette technique voit son champ d'application s'élargir en particulier aux céramiques de haute technologie. Elle est essentiellement pluridisciplinaire et implique une collaboration entre physiciens des plasmas, chimistes des organométalliques, physicochimistes, chimistes des polymères, électroniciens...

Les problèmes actuels concernent la connaissance et la modélisation des plasmas et des réacteurs, la maîtrise des interfaces et des taux de germination, la caractérisation de l'adhérence et

l'homogénéité en composition et en épaisseur, et enfin une meilleure connaissance de la phase gazeuse, impliquant la détermination des processus de décomposition des précurseurs au sein de cette phase, en vue de l'obtention de matériaux prédéterminés.

L'accent est mis sur la maîtrise de matériaux à haute valeur ajoutée : diamant, c-BN, supraconducteurs, multicouches, couches à gradient... Les recherches s'orientent vers des méthodes associant plusieurs techniques telles que plasma froid et faisceau d'ions en vue d'abaisser la température de dépôt, améliorer l'adhérence, diversifier les sources de précurseurs et développer de nouveaux matériaux.

### **B-Précurseurs solides**

Depuis quelques années se développe une chimie du solide à température ambiante ou à température relativement peu élevée. Les solides utilisés présentent une structure ouverte, en général de basse dimensionalité. Les réactions ont le plus souvent un caractère topotactique, des éléments structuraux importants du précurseur se retrouvent inchangés dans le produit final. Les réactions mises en jeu sont des réactions chimiques ou électrochimiques d'oxydation ou de réduction du solide, des réactions d'échange ionique ou des réactions acido-basiques au sens de Brønsted.

**L'intercalation-désintercalation de cations monovalents** par voie électrochimique a été largement mise en œuvre au cours de ces dernières années par les chimistes du solide. L'objectif principal est la recherche de **cathodes à insertion** réversible pour le stockage chimique de l'énergie, la désintercalation de composés ternaires préparés selon les méthodes classiques de la chimie du solide permet d'obtenir des phases métastables inaccessibles par d'autres voies : halogénures, oxydes ou chalcogénures. Une réelle percée vient d'être effectuée dans le domaine de l'intercalation électrochimique, il s'agit de l'intercalation électrochimique d'oxygène dans des oxydes. Celle-ci peut modifier radicalement leurs propriétés. Partant d'une brown-

millerite  $\text{Sr}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  (perovskite lacunaire ordonnée), un composé du fer TV la perovskite  $\text{SrFeO}_3$  est ainsi préparée. Partant du semi-conducteur  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  il s'est avéré possible d'obtenir par oxydation anodique la phase métallique  $\text{La}_2\text{CuO}_{4+d}$  à température ambiante, qui, par refroidissement, devient supraconductrice (supraconducteur à haut  $T_c$ ),

Les réactions de chimie douce interviennent à une température permettant d'associer entités organiques et minérales et d'élaborer ainsi des matériaux nouveaux. Il peut s'agir par exemple du greffage de molécules organiques sur des matrices minérales conduisant à des structures lamellaires moléculairement modifiées (MELS) des structures pontées. Leurs domaines d'application sont très variés : catalyse hétérogène, membranes, matériaux électroactifs...

### **Forces et faiblesses**

Un point fort incontestable de ce domaine réside dans le fait que les équipes françaises ont joué un rôle de pionnier dans le domaine de la chimie douce (sol-gel, intercalation, structures ouvertes). Cette recherche est très pluridisciplinaire (chimie organique, chimie moléculaire, chimie du solide, électrochimie, céramiques, physique).

Par ailleurs, l'activité CVD, OMCVD et CVD plasma est présente, au sein de petites équipes, dans l'ensemble des Universités. Une forte interaction entre recherche fondamentale et industrielle se retrouve pour toutes les composantes de la chimie douce; les laboratoires disposent de nombreux contrats, dont certains ont pu déboucher sur des réalisations originales (dorsales antistatiques, membranes inorganiques, revêtement anti-reflets...).

Par contre, dans le domaine du sol-gel, la recherche industrielle française est malheureusement absente sur le plan international alors que les firmes japonaises ou américaines présentent de nombreux travaux scientifiques lors des Congrès internationaux. Les procédés "sol-gel" sont actuellement à la mode et d'aucuns tendent à les considérer comme



des procédés miracles; ils se découragent très vite quand les résultats ne sont pas à la hauteur de leurs espoirs. Cette attitude nuit au domaine sol-gel qui pose de vrais problèmes fondamentaux nécessitant une recherche à long terme.

La demande de l'OMCVD et CVD assisté plasma souffre d'une concertation insuffisante entre les équipes de recherche et d'une carence en équipements susceptibles de fonctionner en milieu industriel.

## Rencontres interdisciplinaires

L'électrocristallisation fait appel à toutes les branches de la chimie :

- chimie des hétérocycles,
- chimie de coordination de ligands rédox,
- chimie théorique (couplage entre processus rédox intramoléculaires et instabilités structurales, structures de bandes... ); modélisation de la structure de systèmes moléculaires complexes,
- chimie, structure, dynamique des systèmes moléculaires organisés (émulsions phases lyotropes, cristaux de films...),

et à la physique de la matière condensée (propriétés structurales et électroniques, diffusion des rayons X; apport des techniques utilisant le rayonnement synchrotron à la caractérisation des propriétés structurales et électroniques des solides; transitions de phases).

La création du Greco "sol-gel" et du Greco "verre" a joué incontestablement un rôle moteur dans la concertation entre laboratoires appartenant à des disciplines voisines : chimie inorganique, chimie du solide, chimie organique, physique. Depuis six ans, trois écoles d'été "sol-gel" ont été organisées. Elles réunissent une centaine de chercheurs et donnent lieu à la publication de documents. Au niveau européen, la création d'Eurogel permet des

rencontres entre industriels et scientifiques alternativement à Colmar et Sarrebrück.

Dans le domaine de l'OMCVD et plasma, le Greco 57 (interactions plasmas froids - surface) permet de coordonner les relations entre laboratoires de recherche et industrie (modélisation, diagnostics *in situ*, caractérisation des matériaux obtenus). Le PIRMAT soutient également quelques actions telles que "supraconducteurs par CVD ou revêtements durs".

Le Groupe Français d'Etude des Composés d'Insertion (GFECI) et l'action coordonnée européenne "*Pillared Layered Structures*" réunissent scientifiques et industriels travaillant dans le domaine du stockage chimique de l'énergie et dans celui des nanocomposites.

## 3 - SYNTHÈSE ORGANIQUE

La chimie organique de synthèse apparaît aujourd'hui comme un secteur en fort développement. Ceci est dû principalement à ses interactions avec de nombreuses autres disciplines qui lui demandent de concevoir et de construire des molécules, le plus souvent complexes, nécessaires à la progression de leur propre recherche. Ce fait est particulièrement net pour le secteur des sciences de la vie qui a besoin de nouveaux produits biologiquement actifs, mais aussi pour de nombreux autres domaines : matériaux (supraconducteurs, polymères conducteurs), chimie supramoléculaire (nouvelles molécules "hôtes"), etc. Il s'ensuit que le chimiste organicien de synthèse est conduit à être un élément important, de nombreuses actions pluridisciplinaires; les problèmes qui lui sont posés l'amènent logiquement à développer et à améliorer ses deux centres d'action traditionnels : la méthodologie et la synthèse multiétapes.

## Evolution et tendances

### A - Méthodologie de synthèse

Le bilan des dernières années a été excellent en ce domaine où l'imagination et l'activité intense de nombreuses équipes ont permis d'effectuer des progrès importants dans l'amélioration d'un grand nombre de réactions déjà existantes; en particulier, de nombreux efforts ont été consacrés à la **création simultanée et stéréocontrôlée** de plusieurs liaisons carbone-carbone. A titre d'exemples, on peut notamment citer

- les cyclisations radicalaires et celles catalysées par les métaux de transition (réactions de Heck intramoléculaires) qui autorisent la construction en une étape de systèmes polycycliques;

- les réactions de cycloadditions ou de réarrangements sigmatropiques **en cascade** qui permettent d'arriver au même but et auxquelles on peut joindre de multiples exemples de "réactions tandem" (une première transformation donne naissance à un intermédiaire susceptible de conduire immédiatement à une seconde transformation);

- la mise en œuvre d'entités à double réactivité potentielle, par exemple des bis-organométalliques possédant deux liaisons carbone-métal de réactivité modulée capables de réagir successivement dans le même processus réactionnel avec deux électrophiles différents.

Un autre secteur d'intense activité a été celui de la mise au point de **réactions énantiosélectives** nombre d'entre elles conduisant maintenant à des produits de très haute pureté optique (excès énantiomériques supérieurs à 95 %), tant dans la formation de liaisons carbone-hydrogène ou carbone-oxygène que dans celle, réputée plus difficile, de liaisons carbone-carbone (addition d'organométalliques et d'énolates, transferts de chiralité, cycloadditions, etc.). L'augmentation constante de l'efficacité de ces réactions a été accompagnée d'un assouplissement des contraintes expérimentales

(possibilité d'opérer à température ambiante) et par la mise au point d'auxiliaires chiraux utilisables en quantités catalytiques.

Enfin, une préoccupation constante traduite par de multiples progrès a été de réaliser des **réactions dans des conditions peu polluantes** : chimie en phase aqueuse ou en milieu organisé (avec éventuellement utilisation de systèmes catalytiques solubles), chimie sur support solide, activation des molécules par des processus divers (ultra-sons, hautes pressions), réductions ou oxydations électrochimiques, etc. Ces divers points sont plus particulièrement développés dans d'autres parties de ce rapport, mais on peut malgré tout remarquer que les méthodes d'activation nécessitant des conditions non habituelles (Sonochimie, thermolyse éclair, piézochimie, microondes, photochimie) sont d'un emploi de plus en plus fréquent dans les stratégies de synthèse en raison de leur double intérêt : réalisation de transformations impossibles dans les conditions usuelles, et augmentation, parfois considérable, de l'efficacité de réactions connues. Un effort soutenu est actuellement effectué dans le sens d'une meilleure compréhension des phénomènes physiques mis en jeu afin de pouvoir améliorer la sélectivité des processus réactionnels.

### B - Synthèses multi-étapes

Les progrès de la **synthèse sélective** ont entraîné (ou ont été accompagnés par) la réponse à de nombreux défis posés par l'accès à des édifices moléculaires complexes : produits naturels biologiquement actifs ou composés voisins, mais aussi molécules utilisables en **reconnaissance moléculaire** dans son sens le plus général : nouveaux cryptands, enzymes artificielles, peptides non naturels, etc.

Les résultats les plus spectaculaires ont toutefois trait à la synthèse de produits naturels possédant de multiples centres stéréogéniques formés avec une maîtrise pratiquement totale du contrôle des configurations, même dans le cas de macrocycles ou d'éléments structuraux acycliques pour lesquels un tel contrôle apparaissait encore, il y a

peu, assez illusoire. L'impression d'ensemble actuelle est que pratiquement toute structure, si complexe soit-elle, est devenue accessible avec un rendement d'ensemble satisfaisant grâce à des stratégies d'approche mûrement réfléchies et une efficacité de chaque étape-clé assurée par les multiples progrès de la méthodologie.

Un exemple, parmi beaucoup d'autres, illustre les possibilités de la synthèse organique actuelle : **la palytoxine**, composé naturel d'origine marine comportant une chaîne carbonée linéaire de 115 atomes de carbone, 65 carbones asymétriques et 7 doubles liaisons, a pu être préparée en 1989-90 avec un excellent contrôle de tous ses centres configurationnels. Un exemple à peine moins spectaculaire, et qui illustre bien l'apport de la chimie organique à la biologie, est celui de l'agent **immuno-suppresseur FK506**, composé qui inhibe sélectivement les gènes précoces d'activation des cellules T mises en jeu dans la production de certaines protéines (interleukines, interferon...) impliquées dans l'immunorégulation. Ce composé possède un cycle macrolactame de 21 atomes, 13 carbones asymétriques et une double liaison trisubstituée; il a été entre autres spécifiquement préparé en seulement 32 étapes avec une grande maîtrise dans le contrôle de la création des centres stéréogéniques. Cette synthèse, et celle de la même molécule marquée au  $^{13}\text{C}$ , donne au biologiste un outil pour une meilleure compréhension des phénomènes immunologiques.

Une multitude d'autres synthèses totales ont été ainsi décrites dans les deux précédentes années, visant pour la plus grande part des molécules possédant une activité biologique reconnue. Beaucoup de ces synthèses ont été l'aboutissement d'un travail en profondeur d'amélioration des méthodologies. En cela, l'attribution du Prix Nobel de chimie en 1990 au seul E. J. Corey (Harvard) a logiquement récompensé un éminent chercheur ayant simultanément travaillé dans les deux domaines précités : développement de réactifs hautement sélectifs et synthèses multi-étapes (terpènes, prostaglandines, leucotriènes, etc.)-

## Forces et faiblesses de la recherche française

En ce domaine, la recherche française dispose d'un tissu dense de laboratoires universitaires, en général associés au CNRS et dont la contribution aux progrès enregistrés dans quelques-uns des domaines de la synthèse organique est comparable à celle de la plupart des pays industrialisés. Les axes où cette contribution est du meilleur niveau se rattachent plus particulièrement :

- à la **synthèse énantiosélective** avec des réussites certaines dans la préparation et l'utilisation des sulfoxydes homochiraux, dans la déracémisation de certains composés carbonylés ou de leurs dérivés (imines), dans la conception de ligands chiraux en particulier hydrosolubles, utilisables en catalyse homogène, etc.;

- à la **chimie organométallique** où l'activité est soutenue depuis l'utilisation de nouveaux organolithiens résultant de la déprotonation de certains substrats (hétérocycles, hydrocarbures insaturés...) jusqu'à celle de complexes de métaux de transition (palladium, rhodium, ruthénium, titane, fer...). On peut noter la prolongation d'une étude des organométalliques dérivés de terres rares qui a donné lieu à certains travaux abondamment utilisés et cités, ainsi que la conception et l'utilisation de bis-organométalliques;

- à la **chimie des produits naturels** avec la réussite de quelques synthèses multiétapes de haut niveau (taxoïdes, avermectines, alcaloïdes divers, leucotriènes et composés voisins, vitamines A et E...) s'intégrant dans des programmes pluridisciplinaires. Parmi ceux-ci, il est important de souligner le rôle moteur joué par **l'interface chimie-biologie** qui a stimulé l'activité de nombreux groupes dans le domaine de la synthèse totale d'analogues de produits naturels, les modifications étant destinées à améliorer l'activité biologique du composé parent. Enfin, un point fort reste la chimie des sucres : réactivité, synthèse de polysaccharides, utilisation comme produits de départ homochiraux etc.



En ce qui concerne les faiblesses, une qui n'est qu'apparente mais qui est malgré tout soulignée par les organismes de tutelle réside dans un certain morcellement de la discipline en un nombre important d'équipes distribuées géographiquement de manière assez homogène. Ceci est une caractéristique essentielle de la synthèse organique qui ne nécessite, pour être efficace, ni infrastructures coûteuses, ni fortes concentrations humaines. Cette diversité géographique est en outre compensée par l'habitude prise de longue date d'organiser des rencontres aux formes variées qui vont du congrès bi-annuel auquel participent 700 à 800 chimistes organiciens (Journées de Chimie Organique de la Société Française de Chimie), à des groupes d'études réunissant dans une atmosphère conviviale 50 à 80 personnes (GECO, GECOM...). Cette dispersion de spécialistes qui ont un haut degré de connaissance mutuelle (et souvent amicale) peut alors être considérée comme une force puisqu'elle garantit la présence en tous lieux d'équipes de bon niveau capables de maintenir une recherche et un enseignement de qualité.

Par ailleurs, il existe encore un cloisonnement trop important entre recherche publique et recherche privée bien que le domaine de la chimie organique, et plus particulièrement de la synthèse, soit un de ceux, dans lequel les contacts entre établissements publics et privés sont les plus nombreux. Ceci est grandement facilité par l'excellent niveau de la recherche industrielle et par le recrutement judicieux de ces dernières années qui garantît des résultats à venir. Toutefois, il n'existe pas assez de **transfert d'hommes** entre les deux secteurs, et la recherche privée doit être encouragée à lancer encore plus de défis à l'Université et au CNRS.

Cela aurait sans doute pour conséquence de diminuer le désintérêt d'un certain nombre d'équipes pour la synthèse multi-étapes qui ne peut être valablement motivée que par une demande extérieure pour un type de molécules déterminé (les taxoïdes par exemple).

Enfin, une relative faiblesse vient d'un nombre trop restreint de doctorants et de post-docteurs non

permanents. La synthèse organique (et plus spécialement la synthèse multi-étapes) demande beaucoup de "main-d'œuvre" hautement qualifiée ayant des crédits de fonctionnement importants. Un effort particulier du CNRS, mais aussi du MRE, de la DRED et des Régions serait particulièrement bénéfique en ce domaine.

## Rencontres interdisciplinaires existantes ou pouvant se créer

Les rencontres entre spécialistes de synthèse et spécialistes d'autres disciplines sont nombreuses, et assez souvent fructueuses. Elles doivent être développées en se souvenant qu'une synergie ne peut provenir de la simple juxtaposition des compétences, mais qu'elle résulte, après acquisition d'un langage commun, d'une **cible définie de concert** et d'une volonté de travailler **ensemble** tant à la conception qu'à la réalisation du programme.

Beaucoup de rencontres sont alors possibles dont certaines sont pratiquement inexistantes ou peu développées : avec la chimie inorganique (recherche de nouveaux réactifs), la chimie analytique (conception et préparation de nouveaux supports), la catalyse (utilisation synthétique de catalyseurs nouveaux), la chimie macromoléculaire (synthèse de monomères, d'anti-oxydants, de nouveaux pièges à radicaux libres), etc.

Actuellement, l'interface principale reste celle avec le secteur santé dans le but de découvrir de **nouveaux médicaments**, par une approche de plus en plus conceptuelle des problèmes liée à une connaissance des mécanismes biologiques (le chimiste organicien a d'ailleurs souvent un rôle important dans la détermination de *ces* mécanismes grâce à son approche moléculaire des phénomènes). Dans ce domaine, une place de choix a été faite ces dernières années à l'**inhibition des enzymes** qui exige des études préalables poussées et la synthèse de nombreux composés (substrats, analogues, antagonistes, molécules spécifiquement marquées) pour déterminer le mécanisme d'action de l'enzyme, la structure de son site actif, etc. De

telles études ont déjà été suivies de la mise sur le marché de nouveaux agents thérapeutiques (par les Sociétés MERRELL-DOW et SERVIER par exemple) et, compte tenu des nombreux projets en cours, beaucoup d'autres succès peuvent être escomptés.

La même approche basée sur la conception d'inhibiteurs (analogues d'états de transition ou inhibiteurs suicide) sur la base du mécanisme d'action de l'enzyme cible est une approche encore peu utilisée dans le cadre de **la protection des cultures**. Actuellement, et comparativement à la biochimie animale, un nombre encore très restreint d'enzymes ou de récepteurs intervenant dans la biochimie des plantes et de leurs maladies sont étudiés de manière approfondie au niveau de leur mécanisme moléculaire. Ces études restent un domaine d'avenir important alliant les concepts (effets isotopiques, structure des états de transition, modèles cinétiques, etc) et les techniques (SM, RMN, etc.) de la chimie pure à ceux de la biologie.

De telles études pourraient aboutir à la mise au point de **molécules actives biologiquement vis-à-vis de systèmes végétaux**, par exemple de pesticides (fongicides agricoles, herbicides, régulateurs de croissance...) plus puissants et plus sélectifs, et de ce fait moins polluants pour l'environnement et moins toxiques.

Une meilleure connaissance des systèmes enzymatiques, dont certains sont typiques des plantes, peut, par ailleurs, avoir des retombées dans le cadre de la mise au point de **réaction biomimétiques** (par exemple : enzymes à cytochrome *P-450* et oxydations sélectives de carbones, activés ou non, par des catalyseurs à métallophorphyrine)-

Enfin, on peut noter que la synthèse organique est fortement impliquée dans des domaines traités par ailleurs dans ce rapport :

- **chimie supramoléculaire** pour la mise au point et la préparation de toutes sortes de cryptands destinés à piéger sélectivement des ions ou des molécules neutres;

- **chimie des milieux organisés** pour la synthèse de molécules amphiphiles (bétaines par exemple) nécessaire à la construction de micelles, vésicules, etc.

## 4 - SYSTEMES MOLÉCULAIRES ORGANISÉS

### Evolution et tendances

La réalisation de systèmes organisés permet de retrouver à la fois les avantages des milieux homogènes (ce qu'ils sont macroscopiquement) et ceux des milieux hétérogènes (ce qu'ils sont microscopiquement) ; on peut les définir comme des milieux solvants, microscopiquement hétérogènes.

L'usage de tels systèmes s'inscrit dans révolution normale de la chimie et constitue l'un des deux niveaux de la chimie supramoléculaire. Il s'agit, en effet, de privilégier la notion de systèmes par rapport à celle d'espèces en réalisant des édifices complexes dont le nombre des constituants peut être très grand. Par rapport au premier niveau, "hôte - invité" à 2 ou 3 composés, on a ici des agrégats moléculaires atteignant parfois 100 molécules ou davantage.

### **Quels systèmes moléculaires organisés (SMO) utiliser en réactivité ?**

La formation des SMO met en jeu généralement des molécules de tensioactifs qui, selon les cas, peut conduire à différents SMO,

Le choix entre ces différents SMO dépend de l'objectif à atteindre. Les monocouches, les micelles directes et inverses, les agrégats plus complexes, peuvent être utilisés essentiellement dans des buts mécanistiques pour améliorer la compréhension de la réaction chimique. La synthèse, à but préparatif, suppose que des quantités plus importantes puissent être traitées. Dans ce cas, les microémulsions constituent des milieux de choix.

## Que peut-on attendre des systèmes organisés ?

Les milieux liquides organisés permettent de solubiliser et localiser les réactifs. Lorsqu'on dissout des substances dans ces solutions, elles se distribuent dans la phase continue et dans les objets : il peut alors y avoir compartimentation des réactifs ou des produits. Cette compartimentation peut être mise à profit, par exemple, pour modifier localement les concentrations, empêcher rapproche d'un réactif gênant ou encore ordonner les molécules pour les amener à réagir sélectivement.

Ainsi, il devient possible, en microémulsions par exemple, de réaliser des réactions connues jusqu'alors comme n'intervenant qu'en phase solide.

### Importance des tensioactives

L'un des constituants clés des systèmes organisés destinés à des études de réactivité est le tensioactif, et le premier point à souligner est l'adaptation du TA au type de recherche que Ton veut réaliser. Cela suppose la synthèse de nombreux LA. par des méthodes évolutives, ou encore : la **synthèse modulaire de tensioactifs**.

## Forces et faiblesses

À l'heure actuelle, les "défis en synthèse" dans le domaine des SMO se situent à deux niveaux :

- préparer de nouveaux tensioactifs pour la réalisation de SMO bien définis, ou étudier les corrélations entre la structure des T.A. et celles des objets colloïdaux;

- utiliser les SMO pour réaliser des synthèses sélectives et stéréosélectives.

C'est surtout le premier objectif qui est poursuivi par les chimistes de synthèse français, trois ou quatre équipes françaises seulement travaillant dans le deuxième domaine. Au total, une dizaine d'Uni-

versités françaises abritent des chercheurs engagés dans ces travaux.

**Parmi les points forts** de la recherche française citons : la généralisation du concept d'amphiphilie, la synthèse de TA à partir de sucres, les études dans les milieux non aqueux, où l'eau est remplacée par des solvants polaires et structurés tels que le formamide, le glycérol, etc., tout cela reposant aussi sur des équipes de physique extrêmement compétentes.

**Les faiblesses** concernent les difficultés à atteindre une masse critique suffisante rendant difficile une reconnaissance scientifique hexagonale, et cela en raison essentiellement de l'absence d'enseignements spécialisés dans les Universités et les Ecoles. L'importance des problèmes de Formulation va sans doute rendre obligatoire de tels enseignements. Soulignons aussi les difficultés de mise en place de projets pluridisciplinaires, alliant essentiellement chimie et physique, les physiciens continuant à étudier un nombre limité de systèmes par différentes méthodes et les chimistes offrant une alternative qui consiste à multiplier les systèmes.

En résumé, pour améliorer le fonctionnement de ce secteur et assurer son développement, il semble important

- d'assurer une large démythification de la complexité des SMO et de leur utilisation (informations et enseignements),

- de favoriser une large pluridisciplinarité.

## Rencontres interdisciplinaires

Chaque discipline voisine interroge la chimie des SMO.

- **La biologie**, pour extraire, reconnaître, transformer. A cet égard l'exemple de l'extraction, de la cristallisation et de la détermination structurale des protéines membranaires est très significatif. Le chimiste doit synthétiser plus particulièrement des ré-



cepteurs pour l'étude de cristaux 2D ou de nouveaux tensioactifs pour l'extraction et la cristallisation des protéines,

- **La physique**, pour réaliser des systèmes à fonctions déterminées.

L'électronique moléculaire abonde en demandes de types moléculaires caractéristiques : l'étude des couches monomoléculaires, l'étude des organisations et des structures, corrélée à la structure des molécules amphiphiles, nécessitent un apport novateur du chimiste de synthèse.

Dans cette optique, à l'achèvement des deux GDR (*Nouveaux matériaux tensioactifs* et *Films moléculaires flexibles*) en 1992, il a été proposé la constitution de plusieurs nouveaux GDR, dont l'un regroupera surtout les chimistes, mais encore des équipes de physiciens et de biologistes. Un colloque national, tenu à Bordeaux en octobre 1991, a mis l'accent sur un certain nombre de points importants qui sont pris en compte dans la constitution de ces nouveaux GDR.

Des actions, concertées sur des thèmes porteurs, pourraient ensuite compléter ce schéma.

## 5 - CHIMIE SUPRAMOLÉCULAIRE

### Evolution et tendances

Qu'il s'agisse de **molécules** ou encore d'**assemblées moléculaires complexes**, on attend des objets préparés qu'ils présentent des propriétés spécifiques de plus en plus sophistiquées ou/et être capables d'agir selon un ou plusieurs programmes inscrits dans leur(s) structure(s). Deux aspects, abiotique et biomimétique, différents et complémentaires, sont développés.

- Le premier concerne des fonctions ou propriétés que l'on ne rencontre pas en biologie. Il couvre la **chimie "récepteur-hôte"** classique (re-

connaissance moléculaire, sondes analytiques, transport-activation) ainsi qu'une chimie combinant des métaux de transition situés dans des sites de coordination choisis, et d'autres fonctions chimiques (éléments de chiralité, autres métaux, chromo- ou électrophore,...). L'intérêt serait ici que ces ensembles moléculaires puissent remplir des fonctions ou rappeler des objets du monde macroscopique (photodiodes moléculaires, photo-commutateurs, doubleurs de fréquence amplificateurs, indicateurs, adressage électrique, photonique...)-

- Le développement des **aspects biomimétiques** de la chimie supramoléculaire est motivé par des possibilités d'application à long terme : MMO, Cytochrome P450 (RH  $\rightarrow$  ROH), photosynthèse, fixation de N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>..., multiples transformations de substrats organiques...

Plusieurs thèmes semblent dominer l'effort présent :

- Synthèse linéaire ou convergente de (très) **grosses molécules multifonctionnelles** (fonctions chimiques, physiques, électriques...). Les objets peuvent comporter des parties organiques et inorganiques. Développement des concepts et principes d'emboîtement de systèmes condensés de caractère organique-inorganique, De très gros systèmes peuvent être également obtenus par voie itérative ("dendrimères", oligomères variés...).

- **Modification de molécules biologiques** afin de les rendre aptes à remplir les fonctions désirées : approches de type "abzyme", cyclodextrine...

- **L'auto-assemblage et auto-organisation d'éléments de synthèse** est une voie particulièrement prometteuse. Parmi les forces motrices pouvant conduire à la formation de l'édifice, citons : les liaisons H (très en vogue), les interactions coulombiques (faiblement directionnelles et peu sélectives), les interactions d'ions radicaux au sein de systèmes donneurs/accepteurs à l'origine de la construction d'édifices nouveaux, l'utilisation de

métaux de transition comme éléments assembleurs; la combinaison de différentes forces (hydrophobes, liaisons H, coulombiques, van der Waals) peut conduire à des mésophases fonctionnelles qui peuvent à leur tour servir de milieu structurant (orientant) propice à la mise en œuvre de nouveaux types d'assemblages.

## Forces et faiblesses

La chimie supramoléculaire est un domaine jeune en plein essor. L'effort en synthèse et étude de réactivité doit encore s'accroître. Le niveau vis-à-vis de la compétition internationale est très élevé. Le point fort reste une grande capacité inventive associée à un potentiel important de groupes mobilisables. Notons l'émergence de l'approche supramoléculaire en chimie de coordination - en particulier *des* éléments de transition - ainsi qu'une percée de la chimie de coordination des terres rares. Les approches théoriques et de modélisation de la structure et la dynamique des objets moléculaires, encore très restreintes, devront être développées ainsi que l'interface (thèmes, concepts, méthodes) avec la communauté française extrêmement vivante, active et brillante des physico-chimistes et physiciens des systèmes moléculaires.

## Rencontres interdisciplinaires existantes ou pouvant se créer

Les thèmes et les concepts de la chimie supramoléculaire sont, bien sûr, proches de ceux de la chimie et de la physico-chimie des milieux organisés développés indépendamment dans ce rapport, (systèmes moléculaires organisés, SMO). Un effort accru tendant à accentuer l'interface avec les physico-chimistes et les physiciens de la matière "molle" mériterait d'être entrepris. Des outils conceptuels et des objectifs novateurs pourraient ainsi être identifiés, conduisant à s'intéresser, en particulier, à la morphologie et la dynamique de formation et d'association (transitions de phases) des objets moléculaires.

Bien sûr, et grâce aux progrès récents de la biologie moléculaire, la place du chimiste et sa capacité à jouer un rôle important dans la transformation de la relation entre l'homme et la notion de vivant sont identifiées et deviendront l'objet d'un nombre croissant d'aventures gratifiantes.

L'interface avec la chimie de la matière condensée est en plein développement et devra être encore approfondie. A cette occasion, l'opportunité d'une exposition aux concepts et méthodes de la physique de la matière condensée doit être vivement exploitée, par exemple autour du thème central des transferts d'électrons (intermoléculaires, à longue distance, notion et rôle des défauts moléculaires).

## IMAGE DE LA CHIMIE

Comme déjà mentionné en introduction, l'image de la chimie perçue par le grand public - et, ce qui est plus grave, par certains collègues d'autres disciplines - est injustement floue et parfois même négative. Deux causes principales peuvent être évoquées :

- la chimie, science polluante, dégrade l'environnement. D'une façon un peu surprenante, elle est, plus que les autres sciences, mise au banc des accusés, peut-être à cause du côté plus voyant de ses installations (cf "le couloir de la chimie" en région lyonnaise), et son image a plus souffert de la catastrophe de Bopal que l'image de la physique n'a été ternie par celle de Tchernobyl (où c'est le régime politique qui a été le plus mis en cause).

D'une façon générale aussi, l'opinion oppose les mauvais "produits chimiques" (autrement dit de synthèse) aux bons "produits naturels", encouragé en cela par l'information en provenance des médias;

- la formation en chimie donnée à la majorité des étudiants et lycéens est mal adaptée; seuls les

spécialistes ont accès aux "bonnes" informations qu'ils ne sont pas toujours aptes à répercuter. Ce sont ces deux points qui vont être analysés plus en détail ci-après, car ils font de plus en plus partie des préoccupations courantes de tous les chercheurs du secteur.

## 1 - LES DÉFIS EN SYNTHÈSE ET L'ENVIRONNEMENT

L'effort essentiel de la recherche fondamentale a porté jusqu'à présent sur la mise au point de savoir-faire destiné à l'accès à des structures cibles, souvent même complexes. Le devenir des sous-produits accompagnant ces synthèses, ainsi que l'impact de leur mise en œuvre sur l'environnement, a été souvent négligé.

Plusieurs domaines méritent un développement à court terme.

### Les matières premières

Les matières premières restent en grande majorité d'origine fossile. Dans ces domaines, la recherche publique française accuse un retard certain.

Pourtant, l'agriculture produit des déchets innombrables donc la valorisation peut conduire à une substitution aux matières premières fossiles. Ce réservoir de chiralité, très mal exploité pour une éventuelle production d'éthanol, peut être valorisé en substances élaborées dont la chimie de spécialités ou la thérapeutique ont besoin. Il faut toutefois distinguer ce type d'approche de la classique chimie à partir de sucres qui passe en général par de nombreuses étapes de protection-déprotection. Une chimie basée sur la production végétale était d'ailleurs florissante au début du siècle, mais a progressivement perdu son importance. Avec les efforts faits par la communauté européenne en particulier, ce domaine doit regagner du terrain, que ce soit pour l'obtention de substances complexes ou la production des matières premières.

## La mise en œuvre de la synthèse chimique

Les problèmes d'environnement conduisent de plus en plus à éliminer les solvants organiques usuels, notamment chlorés ou aromatiques, et de nouveaux milieux réactionnels doivent être développés (chimie dans l'eau, en milieu supercritique, sous ultra-sons ou pressions élevées, milieux organisés en phase aqueuse). La chimie sans solvant reste encore à développer.

La coproduction de sels ou de sous-produits dans la synthèse a été trop souvent ignorée. Il faudra mettre au point des réactions plus convergentes,  $A + B \longrightarrow C$  plutôt que  $A + B \longrightarrow C + D$ .

Les métaux hautement toxiques (Hg, Sn, Cr, etc.) devront progressivement être remplacés ou recyclés, ce qui reste un défi majeur.

La synthèse par catalyse va encore se développer, grâce notamment à la faible quantité de réactifs mis en œuvre. En particulier les réactions d'oxydation et de réduction utilisant l'air, l'eau oxygénée, ou l'hydrogène sont encore à améliorer. De même, les métaux précieux, très utiles en catalyse hautement sélective, doivent pouvoir être récupérés ou recyclés, ce qui conduira à de nouveaux systèmes catalytiques insolubles (hétérogènes) avec des propriétés similaires aux catalyseurs homogènes actuels.

On peut inclure dans ce type de réaction l'électrochimie qui ne consomme ou ne fournit que des électrons au système, ainsi que la catalyse enzymatique. Cette dernière constitue d'ailleurs une façon de réaliser des synthèses hautement sélectives, de manière catalytique, et dans un milieu aqueux, pour des réactions que Ton ne sait d'ailleurs pas mettre en œuvre autrement.

La chimie sans groupe protecteur est aussi un défi qui a été peu abordé.



## Le devenir des effluants

Bien que l'industrie ait pris en compte les problèmes posés par ses rejets, des progrès considérables restent à réaliser dans le domaine du traitement et du suivi des effluants.

On peut citer les besoins dans la mise au point de méthodes d'analyses permettant d'identifier des traces de polluants au niveau du ppb et en-dessous. Ces méthodes seront aussi utiles pour le suivi de la biodégradation ou la métabolisation des molécules organiques dans l'environnement. Dans ce domaine, un effort important reste à faire pour maîtriser par bioconversion la destruction des effluants organiques.

Ce sont là quelques problèmes qui restent d'actualité et à la solution desquels la recherche consacre des efforts notables qui sont toujours assez longs à porter leur fruit. Là comme partout ailleurs, il ne suffit malheureusement pas de dénoncer pour résoudre. La communauté des chimistes, et en particulier les industriels, a déjà beaucoup fait pour respecter l'environnement, mais il lui est difficile de répondre à deux demandes contradictoires : fabriquer les produits (parfois superflus) dont la société moderne ne peut pas se passer, et respecter **totale**ment la nature et les sites. De plus la chimie reste une science dangereuse, et les innombrables précautions qui sont prises par les spécialistes ne peuvent malheureusement pas garantir une absence totale de risques. L'important est qu'il y ait dans l'opinion des gens la conscience que les spécialistes des divers domaines ont fait plus pour améliorer leur vie (et pour la sauver le cas échéant) que pour leur nuire, et qu'ils sont, plus que tout autre, soucieux des problèmes et aptes à les résoudre.

## 2 - FORMATION ET INFORMATION

Comme mentionné au début de ce chapitre, un des points forts de la chimie réside dans un **enseignement supérieur** bien structuré et de bonne qualité, qui donne aux étudiants spécialisés (2ème

cycle, école d'ingénieurs) un niveau élevé de compétence. Malheureusement, les autres types d'enseignement sont plus déficients et donnent souvent de la chimie une image surannée qui ne correspond en rien aux préoccupations de la discipline. Au lieu d'insister sur les apports de la chimie à la vie quotidienne et sur son côté expérimental, qui lui fait concevoir et préparer des molécules valorisables, elle insiste sur les notions (fort utiles au demeurant) de pH, de thermodynamique abstraite, d'atomistique réduite à la résolution savante de l'équation de Schrodinger, etc. Ceci est dû à diverses raisons :

- les Français se veulent "cartésiens" et ils n'admirent que les sciences dites cartésiennes (mathématiques, physique...). Toute l'éducation les pousse à un léger mépris des sciences expérimentales, assimilées à une certaine forme de travail manuel (caractère "col bleu") pour privilégier la résolution d'un "beau" problème (caractère "col blanc")... qui a d'ailleurs déjà souvent fait les délices des générations précédentes.

- Cette éducation faussée a deux causes principales :

- l'existence, dans l'enseignement secondaire et même (ce qui est encore plus grave) au niveau des classes préparatoires, de professeurs de physique et chimie (héritage du XIXème siècle : **est-il** encore possible d'être spécialiste dans deux disciplines si différentes ?) qui, pour les raisons données plus haut, préfèrent être plutôt physicien-cartésien que chimiste-expérimentateur...

- la faiblesse chronique des moyens mis à la disposition des travaux pratiques (au premier cycle universitaire en particulier) qui pousse à un enseignement totalement abstrait et ne permet pas de laisser le plaisir de constater le lien entre la pensée (qui imagine) et le geste (qui réalise). Les étudiants "découvrent" alors la chimie au niveau du second cycle : l'inconvénient est qu'il ne reste alors que ceux qui veulent en faire leur spécialité. Pour les autres (la plus grande part), l'image est définitivement faussée...

Une amélioration peut être espérée si Ton en juge par les objectifs du futur enseignement de la chimie au lycée et au collège : *"renseignement de la chimie, science de la transformation de la matière, a pour premier objectif de faire acquérir les méthodes propres à la démarche scientifique (découverte, observation, analyse, mesure, raisonnement, expérience, abstraction, modélisation) et technologique (conception, fabrication, distribution). Peut-être plus que les autres disciplines, la chimie rassemble l'ensemble de ces activités. Le deuxième objectif tout aussi fondamental, est déformer le citoyen-consommateur au bon usage des produits chimiques qu'il est amené à utiliser dans la vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et le respect de l'environnement."*

Il faudra bien sûr former les enseignants qui rempliront cette mission et leur donner ensuite les moyens de l'accomplir.

**L'information sur la chimie est inexacte**, et bon nombre de ses apports sont méconnus du grand public. Qui peut savoir, à titre d'exemple, que le produit abortif RU 486 doit aussi beaucoup à l'équipe de chimistes de Roussel-Uclaf ou que les parfums des plus grands couturiers sortent tels quels des laboratoires et unités de production de Roure-Bertrand...

Bien sûr, depuis quelques années, certaines grandes firmes ont entrepris des campagnes publicitaires valorisantes, mais elles sont souvent atténuées par le fait que ces firmes commercialisent leurs produits sous d'autres marques et, en conséquence, que la relation "chimie-produit utile" ne s'établit pas bien.

Les chimistes ont leur part de responsabilité dans cet état de fait, et force est de reconnaître qu'ils savent mal vanter leur discipline en s'exprimant d'une manière simple, compréhensible par le plus grand nombre. Ils ont alors tendance à parler uniquement des applications, entretenant en cela le flou sur leur propre problématique et "tirant les marrons du feu" pour les spécialistes d'autres domaines plus perceptibles au grand public (secteur

bio-médical, matériaux, agro-alimentaire, cosmétique, etc.). Il est vrai qu'il est fort malaisé de parler en termes "clairs" de cinétique rapide ou de synthèse énantiosélective. Il faut y parvenir : une réflexion de la Société Française de Chimie ou des spécialistes de communication des grands organismes (CNRS en particulier) est en ce domaine absolument indispensable.

## CONCLUSIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les divers paragraphes de ce chapitre ont déjà fait état de quelques recommandations et esquissé diverses perspectives. Nous allons donc ci-dessous ne mentionner que quelques réflexions, les unes inhérentes à la discipline, les autres plus générales. La liste n'en est pas exhaustive et certaines peuvent paraître banales : elles reflètent seulement des critiques et suggestions faites lors des réunions des membres du groupe ayant collaboré à la rédaction de ce chapitre.

### 1 - LES ÉCHANGES (IDÉES ET PERSONNEL)

Il paraît évident qu'un des points forts du secteur chimie réside dans le tissu dense de liens qu'il a su créer avec des spécialistes d'autres disciplines, particulièrement dans les divers domaines de la physique, des sciences de la vie et des sciences de l'ingénieur. Il est probable et souhaitable que ce caractère pluridisciplinaire d'une partie de la recherche ira en augmentant, mais il faudra que l'aide prévue par les organismes (supports de type GDR, interfaces, etc.) s'inscrive dans la durée avec une dotation régulière en moyens et en personnel pour permettre une continuité dans l'action, toujours plus lente à porter ses Fruits que celle d'un programme mono-disciplinaire.

Par contre, les relations entre les divers domaines de la chimie sont peu fréquentes : faciles à créer en apparence, elles devraient pourtant pouvoir conduire à des résultats plus directement valorisables, et pour ne citer qu'un exemple, des collaborations suivies entre chimie de coordination, catalyse et synthèse devraient avoir des répercussions positives. Il paraîtrait souhaitable de développer pour cela quelques actions incitatives.

Un des points forts de la chimie réside aussi dans la cohabitation de la recherche publique et de la recherche industrielle. Là encore, des liens nombreux se sont tissés, nettement (et parfois trop...) encouragés par les organismes publics, CNRS et MRE en particulier. L'inconvénient est que ces relations tournent parfois (souvent ?) à la prestation de service financée de surcroît par des fonds publics qui ne sont distribués que s'il y a partenariat... comme si ce partenariat était garant du caractère fondamental et novateur de la recherche entreprise. En règle générale, on peut dire que l'industrie est trop intéressée par les résultats à court terme et que sa collaboration et les thèmes qu'elle soutient sont trop fluctuants. Là encore, une action inscrite dans la durée et dans la prospective paraîtrait souhaitable.

Enfin, le champ des relations internationales paraît défavorable à la recherche française qui met trop de personnel à disposition des "concurrents" (particulièrement américains) sans être payée de retour. S'il semble hautement souhaitable que "**l'élite**" aille au contact direct des plus grandes universités et des meilleurs spécialistes mondiaux, la mise à disposition de laboratoires étrangers ne doit pas être effectuée systématiquement pour tous les chercheurs qui en font la demande. Pour la majorité, des **échanges** à l'intérieur de la CEE, ou même seulement entre laboratoires français seraient tout aussi bénéfiques.

personnel et de crédits de fonctionnement : c'est une science de "main d'oeuvre" effectuant des réactions sur des produits consommables (au sens administratif du terme...). Une grande faiblesse des laboratoires publics réside dans le nombre trop faible de chercheurs, permanents et surtout de doctorants; les bons candidats existent pourtant, mais le nombre de bourses de thèse est trop réduit. De même, la relative faiblesse des crédits mis à disposition de nos laboratoires, comparativement à ceux dont sont dotés les collègues des pays voisins, ne permet pas souvent les avancées spectaculaires qu'attendent les organismes de tutelle.

Une critique unanime concerne l'atomisation du financement des équipements mi-lourds qui oblige à une "quête" fastidieuse auprès des divers organismes distribuant pourtant tous de l'argent ayant une même origine : le contribuable. La régionalisation de tels crédits présenterait deux avantages : l'unicité de la demande et la distribution homogène des appareils sur la totalité du territoire,

Un autre type de critiques visait la gestion des personnels. Générales à l'ensemble du CNRS, et objet de nombre de préoccupations des directions scientifiques, elles sont (au moins en partie) abordées par ailleurs dans ce rapport.

Malgré tout, et quelles que soient les imperfections du système, il importe de dire en conclusion que le rôle du CNRS dans la recherche française est absolument fondamental et que le **rang plus qu'honorable tenu par la chimie de notre pays dans le concert international** est dû, pour une bonne part, au rôle que cet organisme n'a cessé de jouer depuis sa création.

**Jacques Gore**

*Président du groupe 11*

*avec la collaboration de*

*Jean Durand*

*Yannick Hoppillard*

*Françoise Lahmani*

## 2 - LES MOYENS

### (SUBVENTIONS ET PERSONNEL)

Le caractère essentiel et général de la recherche en chimie est de nécessiter beaucoup de



# 12

## GENIES, PROCEDES : TECHNIQUES, IMPACTS, ÉCONOMIE

### INTRODUCTION

#### ***le génie, une science et une discipline d'action***

Parallèlement aux Sciences de Connaissance dont l'objet d'étude est la nature dans tous ses aspects, il existe une Science de l'Action, dont la finalité et l'objet d'étude sont l'action productive, action dont le résultat visé est un produit au sens large : matériel, intellectuel, socio-économique. Et l'intégration d'un fait productif dans un processus de réflexion, de conception, d'application et de production est la préoccupation essentielle d'un génie. Les effets de taille, d'échelle apparaissent ; les génies s'adressent aux problèmes macroscopiques posés par les transformations industrielles, que ce soit du passage de la réactivité moléculaire au réacteur chimique, de la propriété mécanique ou électrique à l'outil, à l'appareillage, ou de l'activité cellulaire à la production biologique.

Dans cette perspective, on peut tenter les définitions suivantes et dire qu'un génie est l'ensemble des connaissances et techniques concernant la conception, la mise en œuvre et les applications de procédés, de dispositifs, d'appareils. Un procédé est une méthode pratique pour réaliser une

transformation de matière, d'énergie, d'information, cette transformation pouvant être structurale, morphologique ou autre, et aussi bien mécanique, que chimique ou énergétique.

L'un des objets des Sciences pour l'Ingénieur est de fournir des outils et des concepts nécessaires à l'étude, la mise au point ou l'amélioration de systèmes industriels. Ce faisant, elles sont créatrices de valeurs : valeur de connaissance, de longue haleine, d'une part, et il s'agit là d'une science avec des théories, des modèles et une réflexion sur elle même, et valeur d'application, à plus court terme, d'autre part, où il s'agit alors de méthodes industrielles où l'intervention concerne la préoccupation pour le produit, le procédé de fabrication, le couplage du produit avec le procédé, ainsi que la maîtrise de l'environnement social et économique.

Forts de ces valeurs, les génies peuvent aujourd'hui prétendre au rang de disciplines scientifiques. On note l'identification d'une finalité et d'objets d'étude, autrement dit du champ d'action, l'existence d'un corps conceptuel et d'une méthodologie spécifique, et enfin une réflexion sur soi-même, traduite par un métalangage, diffusée dans une communauté internationale organisée.

Connaissances et techniques ne sont pas nécessairement et réellement constituées : la dé-

marche vers l'aval, avec une notion de performance qu'elle soit technique, sociale, économique ou humaine, se place dans un processus itératif plus que séquentiel vers l'amont, la recherche fondamentale.

**Le génie : une science de transfert technologique pour les grands défis du XXI<sup>e</sup> siècle**

Concevoir une installation à partir de données de laboratoire comporte une phase d'extrapolation avec une forte prise de risque financier, à cause de facteurs d'échelle pouvant atteindre quatre à cinq ordres de grandeur. Utiliser une installation industrielle nécessite la recherche de son fonctionnement optimal et la maîtrise de la qualité des produits.

Les génies se situent toujours dans les préoccupations de l'ingénieur, et le progrès des connaissances dans ces domaines a toujours été à la base de progrès significatifs technologiques de notre société. Les procédés de mise en œuvre représentent des enjeux économiques considérables. Enfin, les progrès peuvent et doivent apporter une contribution décisive à la plupart des grands défis stratégiques de l'an 2000 tels que l'utilisation rationnelle des ressources, l'alimentation et la nutrition, la protection de la santé, de l'environnement, la sûreté des procédés industriels et des produits, les transports et la communication, le développement du tiers monde.

**Unité et diversité des génies**

Cette science a une transdisciplinarité forte qui ne doit pas s'entendre seulement au sein des sciences de l'ingénieur. Elle se prolonge jusqu'aux sciences humaines et sociales. L'enjeu est aussi une meilleure prise en charge des activités humaines, des phases de conception jusqu'à celles de conduite pour la fiabilité et la qualité.

Les génies sont multiples, qu'ils relèvent du microscopique, du macroscopique ou de l'instrumental. Au-delà des génies matériels, il y a encore les génies de type informationnels et socio-économiques.

Mais dans cette diversité, la discipline se distingue par le caractère unitaire de son approche, de ses objectifs et de ses méthodes. Les différents génies utilisent le rôle particulier de l'approche systémique, qui, sans être un objectif en soi, vise à donner une description macroscopique globale d'un processus dans un but opérationnel, en contraste avec les disciplines de base. Ils conduisent une approche intégrée qui considère simultanément l'ensemble des contraintes, y compris celles liées à l'environnement économique et social. Et enfin, ils se distinguent par leur aspect opérationnel, au sens de l'utilisation par un non spécialiste, par l'édiction de règles d'usage, et l'optimisation de la production. L'approche systémique se révèle souvent insuffisante car il est aussi nécessaire de connaître les mécanismes élémentaires et de préciser comment ils influent sur un comportement global.

Les génies ont en commun les objectifs de :

- sécurité des personnes, des appareils, des installations, de l'écosystème,
- fiabilité d'usage pour les systèmes statiques, de fonctionnement pour les systèmes dynamiques, d'information,
- qualité qu'il s'agisse du développement de procédé "zéro-défaut", ou de garantie rigoureuse en terme d'usage de produit; elle s'obtient au prix de la maîtrise du couplage du produit avec le procédé.

L'émergence de ces nouvelles sciences marque la fin du vieux clivage entre une recherche dite fondamentale, qui serait consacrée aux objets naturels, et une recherche qualifiée d'appliquée, parce qu'elle s'intéresserait aux objets industriels. Ces sciences, dont font partie les génies, marquent le rapprochement entre chercheurs, acteurs socio-économiques et industriels, et l'importance de la transdisciplinarité pour assurer la conception des procédés de demain.

# LES ENJEUX

## 1 - LES ENJEUX STRATÉGIQUES

Sur le plan des principes généraux, il s'agit de proposer à la communauté nationale et internationale des outils de développement économique, et de le faire en minimisant les impacts négatifs sur l'homme et sur la nature, voire de réhabiliter ce qui a été dégradé. Il est possible, bien entendu, de décliner ces objectifs :

- protéger et améliorer la santé,
  - assainir, protéger l'environnement, réduire les nuisances,
  - libérer l'homme des tâches répétitives et pénibles,
  - économiser et mieux utiliser les ressources en énergie et en matières premières,
  - développer de nouvelles filières et de nouvelles techniques, moins polluantes et plus sûres,
  - assurer l'hygiène et la sécurité des installations,
  - minimiser les coûts et délais de développement et de mise au point,
  - contribuer au développement du tiers monde,
- soit encore, en les précisant sur les enjeux nationaux :
- favoriser le développement d'une industrie des équipements, machines, appareils et instruments,
  - développer les utilisations non classiques des produits agricoles,

- développer les synergies et les transferts entre les organismes de recherche publics, semi-publics et privés,

- maintenir et développer une activité de recherche et de développement de haut niveau dans la discipline.

*Comment faire face à ces défis ?*

D'abord, et pour une large part, il s'agit d'améliorer les procédés existants, en productivité, fiabilité, sûreté, propreté et économie locale. En second lieu, il s'agit de repenser complètement les filières de production et les produits eux-mêmes en fonction de ces enjeux. Enfin, il faut créer des méthodes permettant d'accélérer le développement de nouveaux procédés et produits.

Dans le cadre de ces principes généraux, on peut préciser quelques axes :

- accélérer le transfert de méthodes vers l'industrie ou autres secteurs utilisateurs, notamment en direction de secteurs encore peu influencés comme l'agroalimentaire, le médical, la pharmacie,
- développer des méthodes permettant de raccourcir les temps de développement et les temps de transfert,
- repenser les filières de production en fonction de contraintes d'environnement, de sécurité, de disponibilité de matières premières, de variabilité de conditions économiques,
- favoriser le développement d'une industrie des appareils et équipements de transformation, de fabrication et d'usinage, et d'instrumentation,
- favoriser l'étude, l'élaboration de matériaux nouveaux et leur utilisation en tant que structures, et en assurer le contrôle par des moyens divers,
- assurer la maîtrise de l'environnement sonore et réduire les nuisances acoustiques et vibratoires non seulement pour l'homme, mais aussi pour ses réalisations,



- assumer l'accroissement des grandes infrastructures, développer les moyens de transport, ceux d'approvisionnement en eau ou de traitement des déchets liés à la croissance industrielle et démographique en Europe ou au développement du tiers monde,

- soigner le malade, améliorer les techniques diagnostiques et thérapeutiques,

- améliorer les productions animales et végétales et développer une agriculture nouvelle, moins dépendante d'engrais et de pesticides et davantage tournée vers la production de denrées non alimentaires à forte valeur ajoutée,

- maintenir un niveau compétitif - voire de référence - dans les secteurs industriels traditionnels ou de pointe : automobile, aéronautique, aérospatiale, transport ferroviaire, sidérurgie.

Pour tous les domaines du champ, la maîtrise des moyens informatiques et des codes de calcul scientifique est une condition impérative. Les enjeux en sont la productivité (arriver à mettre en oeuvre rapidement une nouvelle idée), la fiabilité (être sûr de ses résultats), la maintenabilité et donc la pérennité des développements.

## 2 - LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

Les défis scientifiques actuels posés à la discipline correspondent pour une large part à des niveaux de complexité croissante à prendre en charge ; complexité des morphologies, des propriétés, des processus et des échelles d'observation. On notera quelques grands domaines.

Les milieux complexes focalisent l'intérêt de plusieurs disciplines, Il s'agit des milieux chimiquement complexes, de solides divisés ou d'agrégats, de milieux polyphasiques, poreux, textures (matériaux composites, milieux biologiques), milieux mous et fluides non newtoniens. Les questions portent principalement sur trois points :

- la formulation de lois phénoménologiques de transport dans ces milieux ou de comportement de ceux-ci,

- le développement de méthodes de mesure adaptées et d'une instrumentation performante en liaison, avec la science des problèmes inverses dont l'objectif est l'analyse des sources au travers du travail de modélisation,

- la maîtrise des procédés mettant en jeu ces milieux.

La dynamique des processus est également un terrain commun à plusieurs disciplines. Le génie des procédés doit développer son approche des systèmes fortement couplés et non linéaires apparaissant dans les réacteurs chimiques et certaines méthodes de séparation. Plus généralement, la connaissance, puis l'exploitation de régimes non stationnaires et de la structuration ou de l'apparition de chaos dans les milieux étudiés, devraient conduire à des nouveaux développements. La dissipation d'énergie dans les processus de transport, de réaction, de mélange, de séparation, de changements morphologiques, doit être comprise plus finement en vue de l'étude de nouvelles formes d'apport d'énergie moins dissipatives, plus locales, plus sélectives. Cette démarche rencontre, bien entendu, les préoccupations de la mécanique des fluides et du génie thermique.

L'étude des systèmes intégrant plusieurs échelles d'observation dans le temps ou l'espace est un nouveau défi. Elle concerne des processus en milieu naturel, des processus industriels et des systèmes multivariables et hétérogènes associant des phénomènes électriques, magnétiques, chimiques, mécaniques et thermiques. L'intégration des méthodes d'homogénéisation ou, plus généralement, des approches micro-macro reste un enjeu important. Cette approche réconcilie la démarche systémique globalisante et la démarche analytique détaillée. Les phénomènes d'interface, également, relèvent de l'analyse multiéchelles qu'ils concernent des phénomènes mécaniques, thermiques ou électriques. En mécanique des structures, la description

correcte des contacts reste un enjeu important pour les procédés de mise en forme. Elle associe des disciplines diverses telles que la tribologie, la mécanique des structures, la physico-chimie des surfaces et la mécanique des fluides. La prévision de l'endommagement et de la fissuration des structures sont aussi des domaines où les enjeux scientifiques sont importants.

Cet aspect transdisciplinaire se retrouve dans de nombreux enjeux scientifiques. Les disciplines de base des génies mécaniques et thermiques sont multiples et de leur maîtrise dépend la modernisation des machines de l'industrie, les transports, l'exploitation de l'espace, la préservation de l'environnement, le contrôle et l'optimisation des systèmes énergétiques. La combustion qui apporte une dimension complémentaire, la réactivité, essentielle pour la maîtrise des systèmes de propulsion et des sources de chaleur, est confrontée à titre principal à la préservation de l'environnement.

De la maîtrise des couplages fluide/structure dépendent aussi bien la réduction de niveaux de vibrations dans la fusée Ariane que la discrétion acoustique d'un sous-marin, la tenue d'une plateforme pétrolière ou le rendement d'une turbomachine.

En génie électrique, la réalisation de nouvelles structures de moteurs ou de convertisseurs statiques à haut rendement nécessite des innovations diverses dans le domaine des matériaux : aimants à haute densité d'énergie magnétique ou à faible perte aux fréquences élevées, isolants solides ou liquides, composants semi-conducteurs.

Le génie acoustique est confronté à des phénomènes complexes qui nécessitent d'articuler des processus physiques (génération du son) et des processus concernés par la psychologie de l'audition (psychoacoustique, perception auditive, acoustique musicale).

Pour les biotechnologies animales et végétales, l'enjeu est double : *cognitif*- comprendre la

fonction des gènes et les mécanismes moléculaires qui les régulent - et *technologique*- repousser les limites imposées par la diversité génétique des populations et les barrières de fertilité. Pour les biotechnologies microbiennes liées à l'utilisation du vivant pour la chimie, l'extension des applications vers la synthèse organique fine constitue un enjeu supplémentaire.

La nécessité d'intégrer dans la démarche scientifique les nouvelles notions de qualité, sécurité, souplesse, respect de l'environnement amènera les différents génies à se rapprocher de la productique et à intégrer quelques nouveaux outils mathématiques (logique floue, réseaux neuronaux).

Pour le génie urbain et le génie industriel, dépasser le cloisonnement traditionnel entre les sciences de l'ingénieur et les sciences de l'homme et de la société est un enjeu essentiel.

Voilà d'ailleurs un trait commun à tous les génies relatifs à la dimension humaine. Les activités cognitives des acteurs humains, dans les processus de conception et les systèmes de production ne peuvent en effet se déduire de ce que Ton sait sur l'organisation des connaissances de sens commun et du fonctionnement cognitif dans la vie courante. Tout un champ de recherche concerne l'ergonomie cognitive et la didactique, et appelle un développement d'une étude épistémologique des génies et procédés.

### 3 - LES ENJEUX ÉCONOMIQUES ET TECHNOLOGIQUES

L'essentiel des poids économiques et technologiques se situe dans les grandes branches traditionnelles de production (énergie, combustible, acier, engrais, matières plastiques, grande chimie, aliments) et donc l'amélioration, sur tous les plans, des performances de ces grandes branches reste un enjeu considérable. Néanmoins ces poids tendent à se déplacer vers de nouvelles productions, à valeur ajoutée élevée, et l'apport relatif de la recherche

scientifique peut paraître *a priori* plus élevé dans ces nouveaux domaines.

Les problèmes de nuisance, de pollution et de respect de l'environnement constituent une préoccupation essentielle de la société d'aujourd'hui et de demain. La sensibilisation récente de l'opinion publique aussi bien que des milieux scientifiques ou industriels provoquée par des événements spectaculaires (marées noires, Tchernobyl, couche d'ozone, ...) souligne l'importance de l'intégration de la réflexion à propos des impacts sur l'environnement dès les phases de conception et d'élaboration. La qualité de la vie, la sécurité et la santé des personnes dépendent de la maîtrise, du contrôle et de la réduction des nuisances. On citera, par exemple, le traitement des déchets, qu'ils soient radioactifs ou non, la maîtrise du nucléaire, les transports massifs de produits dangereux, ... Ces réflexions, ce contrôle et cette réduction des nuisances relèvent tout à fait de la mission des génies. Un soutien particulier devra être réalisé pour que ce rôle puisse être assuré avec efficacité. Il y a une forte interfaction des génies avec les sciences de l'homme et de la société sur les questions concernant le cadre de vie mais aussi celles de l'homme au travail, ou des rapports de la technique et du quotidien.

Les enjeux relatifs à la surveillance, le contrôle de qualité et l'optimisation des procédés de production nécessitent notamment le développement, de systèmes d'investigation, de détection et de contrôle non destructif par voies diverses (acoustique, rayons X, optique, ...).

Un enjeu économique important concerne la réduction des cycles de conception et la maîtrise des procédés et des dérivés de fabrication. L'ingénierie simultanée s'appuie sur des systèmes informatiques qui, à partir de collecte et d'analyse de données, permettent d'injecter dans les systèmes de calcul du savoir-faire. L'informatisation et la partageabilité des bases de données permettront l'accès simultané du bureau d'étude, de l'atelier de fabrication, de montage ou de réparation aux informations. C'est cela aussi l'ingénierie simultanée.

Pour le génie des procédés chimiques ou biotechnologiques, on peut distinguer les enjeux sur les produits, les méthodes et les instruments :

- les produits de spécialité (adhésifs, dispersants, résines, additifs et intermédiaires de synthèse), les catalyseurs, les adsorbants et les membranes, les produits ultrapurs,

- les méthodes de production adaptées à ces produits, les séparations multifonctions à micro et macro-échelle (déchets industriels et urbains), la maîtrise accrue du vivant pour la biotechnologie et ses applications,

- les capteurs et instruments, les outils matériels, les logiciels de simulation et le contrôle commande.

Les génies mécanique, électrique et thermique sont à la base de secteurs entiers de l'activité industrielle, où la France occupe une position privilégiée qu'elle doit préserver. Il s'agit de l'aéronautique et de l'espace, mais aussi des transports terrestres. Sont concernés aussi bien les moteurs que l'aérodynamique ou les Interactions fluide/structures. Ces secteurs sont aussi ceux des composants et des machines de forte puissance, ceux de la production et du transport de l'énergie, et de son utilisation optimale.

On notera aussi les secteurs des lasers de puissance, des lasers chimiques et de leurs applications (interaction laser-matière), les procédés de transport ou de transformation des milieux complexes (fluides ou solides hétérogènes) notamment dans les industries pétrolières et agro-alimentaires, la caractérisation des matériaux nouveaux et la maîtrise des flux polluants.

Le génie mécanique dans le domaine des structures et des matériaux représente le socle de toute activité industrielle puisqu'il est présent dans l'ensemble de l'outil de production. Les enjeux économiques sont extrêmement importants du point de vue de la réduction des durées de conception dans un contexte de qualité et de fiabilité des produits :



par exemple, contribution de la modélisation mécanique et numérique à la mise au point d'outillage de mise en forme pour l'industrie automobile. Il est bon de souligner l'importance de l'intervention mécanique dès les phases de conception (en robotique notamment). Les connaissances de base en structures et matériaux sont source de nombreuses améliorations de procédés. Des enjeux économiques importants en dépendent, et on peut noter en particulier la lente dégradation de l'industrie mécanique en France dans le secteur de la machine-outil qui est due partiellement au soutien insuffisant de ce secteur.

Pour le génie acoustique, les enjeux principaux concernent d'une part la lutte contre le bruit et les vibrations (méthodes passives ou actives) en soulignant l'importance des normes et donc des études prénormatives, et d'autre part les systèmes d'investigation et de détection en notant cependant un point faible du côté des constructeurs français dans ce domaine (contrôle non destructif des matériaux, imagerie médicale).

Pour le génie civil, ces enjeux passent avant tout par la maîtrise de techniques avancées, de matériaux nouveaux et de modélisations plus fines pour le bâtiment et pour des réalisations à caractère exceptionnel (grand barrage, arche de la Défense) et en milieu sensible (tunnels urbains), ou pour l'entretien du patrimoine (diagnostic, réhabilitation, entretien préventif).

Les enjeux, économiques relevant du génie électrique concernent principalement les matériaux (composants passifs et semi-conducteurs de puissance), les systèmes de production, de distribution et de stockage de l'énergie, le contrôle de procédés (chauffage par induction), l'environnement (pollution). On citera les méthodes de mesure de charge d'espace pour câbles de distribution, les nouvelles structures de moteurs à aimants ou d'actionneurs linéaires, l'étude des perturbations conduites et rayonnées par les systèmes de puissance, la modélisation de dispositifs électromagnétiques, les études de contraintes thermiques et mécaniques ayant une origine électrique et l'utilisation d'éléments supra-

conducteurs pour le stockage d'énergie ou comme limiteur de courant.

Pour les biotechnologies les enjeux socio-économiques sont énormes, que se soit dans les pays industrialisés ou dans les pays en voie de développement. Dans le secteur de l'élevage, l'objectif est d'améliorer la qualité des productions ou de produire des protéines hétérologues à haute valeur ajoutée. Dans un avenir très proche, les grands groupes de sélection ou de l'agrochimie proposeront aux agriculteurs des variétés présentant une résistance à certains herbicides, aux maladies virales et fongiques, et mieux adaptées à la conservation après récolte, ou des huiles, protéines de réserves ou matières amylacées de meilleure qualité. L'utilisation des biocatalyseurs (enzymes ou microorganismes) en chimie permettra l'amélioration de procédés existant ou l'émergence de nouveaux procédés contribuant à des productions de haute valeur ajoutée (pharmacie, agrochimie, arômes agroalimentaires) bénéficiant du label "naturel".

On peut dire très globalement que le génie urbain, par rapport aux génies civil et sanitaire, fait passer la problématique de l'opérateur de réseau (eau, énergie, communication) de la meilleure gestion de l'offre de service à la gestion de l'interdépendance entre offre et demande. L'opérateur devient le collectif des personnes qui ont ensemble l'intelligence des effets de réseau. Les enjeux technologiques concernent l'application des nouvelles technologies de communication, de métrologie et d'informatique à la gestion en temps réel. Rendre plus transparente et plus démocratique la gestion des services urbains à fort contenu technique reste un enjeu majeur du point de vue culturel et social.

De son côté, le génie industriel vise à la gestion intégrée des ressources techniques et humaines de l'entreprise, avec l'objectif d'améliorer les performances de celle-ci.

En conclusion, dans un environnement économique, politique et écologique fluctuant, l'un des apports importants des génies devrait sans doute être la génération de souplesse dans l'appareil productif,

permettant de faire face à. d'importants retournements de situation : procédés viables en environnement variable, temps de développement raccourci, adaptabilité à la matière première, aux sources d'énergie, aux contraintes environnementales,

## EVOLUTION ET TENDANCES

Le passé historique des différents génies varie énormément d'une discipline à l'autre. Le génie civil est probablement le plus ancien après le génie militaire qui apparaît à la Renaissance. Il reste une force vive à qui on doit de nombreuses avancées telles que le développement des méthodes d'éléments finis par exemple. Son caractère initialement très généraliste a mêlé des ingénieurs d'horizons divers qui ont ressenti un besoin de recentrage sur certains thèmes précis et, par scissiparités successives, sont apparus les génies chimique, mécanique, électrique, thermique, nucléaire, biologique, rural... Les plus récents génies ont quelques années. Les mises en perspective historique sont donc très diverses.

En génie chimique et des procédés, les évolutions spécifiques suivantes se dessinent :

- la formulation de lois phénoménologiques de transport de matière plus fines et plus exactes et leur incorporation dans des modèles de procédés,
- le développement de méthodes de mesure associées à ces lois de transfert, y compris des mesures en ligne,
- des méthodes et outils plus performants de détermination cinétique et thermodynamique; ceci est un enjeu majeur et le goulet d'étranglement de la modélisation dans les systèmes physico-chimiques complexes,
- des méthodes de modélisation et de simulation de procédés adaptées à de nouvelles questions

de sécurité, de robustesse, de fonctionnement instationnaire, d'environnement variable,

- une approche systémique plus générale, capable de traiter des grands systèmes et d'intégrer le passage micro-macro, et donc plus ancrée dans les connaissances profondes.

Aux interfaces avec d'autres domaines, les liens avec la chimie, la mécanique des fluides, la thermique, l'automatique sont déjà très forts et appellent un approfondissement plutôt que des évolutions thématiques profondes. Avec la biologie, le domaine alimentaire, les matériaux, les interfaces existent et demandent surtout des clarifications structurelles. Dans beaucoup de cas, le génie des procédés est importateur d'outils (par exemple, de mécanique des fluides numérique), exportateur de problèmes, générateur de méthodes de transfert entre l'amont et l'aval.

L'importance de la mécanique des fluides, de la thermodynamique, de la thermique et de la combustion pour la modernisation industrielle, la conquête de l'espace et la préservation de l'environnement explique l'ampleur et la bonne structuration des effectifs de recherche qui leur sont consacrés. Ces effectifs peuvent être renforcés. Il est essentiel qu'existe, dans une même équipe, une forte synergie entre expérience et modélisation. L'étude des écoulements dans des situations complexes peut être développée grâce à l'existence de moyens de mesure (vélocimétrie laser) et de calcul (codes 3D) adaptés, ces problèmes relatifs aux écoulements hypersoniques connaissent un fort développement dans le cadre du programme HERMES. L'interaction entre les fluides et les structures fait appel à une concertation entre mécaniciens des fluides et des structures et acousticiens. Les études numériques et expérimentales doivent être amplifiées, en particulier pour les régimes instationnaires (machines tournantes). L'effort sur les écoulements polyphasiques (bulles, suspensions) et les fluides complexes (non newtoniens et/ou thermodépendants) doit être poursuivi sous l'aspect mesure en particulier. Il s'agit, entre autres, de sécurité nucléaire, ou de problèmes rencontrés en génies chimique, alimentaire, pétrolier ou biomédical

Les problèmes thermiques apparaissent souvent comme primordiaux dans les machines et les procédés, et doivent donc être pris en compte dès la conception, surtout lorsque l'espace est restreint (véhicules). La métrologie et la caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux et des produits sont essentielles. La caractérisation par méthode inverse, la thermographie appliquée au contrôle non destructif, la relation entre les propriétés physico-chimiques des surfaces et le rayonnement, constituent des domaines en plein développement. Les points forts en génie thermique concernent les échanges entre solides et fluides (extraction des hauts flux thermiques, ébullition, condensation, transfert en microgravité), les instabilités thermoconvectives (habitat, géothermie, croissance cristalline), la modélisation des phénomènes de transferts couplés (milieux poreux), le transfert simultané de chaleur et de masse, le séchage, la modernisation des équipements thermiques, l'optimisation des cascades thermiques (échangeurs, pompes à chaleur, machine à froid, stockages), la recherche de procédés continus. Les aspects combustion sont largement abordés dans le chapitre relatif aux énergies du futur.

En mécanique des solides, on a observé depuis une trentaine d'années un développement considérable de la recherche sur les lois de comportement des matériaux et le calcul des structures incluant les aspects non linéaires, anisotropes et les problèmes d'instabilité. La description du comportement des matériaux passe par la connaissance de leur microstructure et des mécanismes de déformation, d'endommagement, de fatigue et de rupture qui peuvent être très complexes vu la diversité des matériaux utilisés et des sollicitations au niveau de la fabrication, des traitements thermo-mécano-chimiques de surface ou de volume, et en service. En génie des matériaux, les modélisations et simulations numériques de procédés qui intègrent thermique, métallurgie et mécanique constituent pour les années à venir des progrès attendus pour la mise au point de nouveaux procédés d'élaboration et de traitement. Une communauté mécanique-matériaux vivante - et souvent citée en exemple à l'étranger - s'est développée en France suite à di-

verses actions structurantes. Les modélisations micro-macro commencent à être utilisées sous forme inverse, c'est-à-dire en tant qu'outil de conception de matériau dont la microstructure est à optimiser. Les problèmes d'interface sont d'actualité et doivent être abordés du point de vue théorique et expérimental en associant mécaniciens (là encore micro et macro), tribologues, numériciens, roboticiens, physiciens de surface. Ils concernent le contact avec frottement, la lubrification, les mécanismes, les liaisons fibre-matrice pour les composites, les collages, l'adhésion, etc. On notera quelques points forts, notamment en tribologie, dans ce domaine, Des modélisations de procédés de mise en forme prenant en compte l'interaction outil/matière commencent à être développées dans l'industrie de transformation (sidérurgie, automobile, emballage). Cet effort dans la démarche matériaux-mécanique-structure doit être étendu à d'autres procédés de fabrication et doit prendre en compte les couplages thermomécaniques, physico-chimiques et les aspects dynamiques. Les travaux sont insuffisants tant du point de vue théorique qu'expérimental dans le domaine des études dynamiques, des transitoires, et des vibrations non linéaires et stochastiques. Pour les mesures et essais la situation peut être qualifiée d'indigente, et il est grand temps de réagir.

Pour le génie des matériaux, des enjeux économiques importants dépendent dans une large mesure de la capacité de notre recherche à accompagner l'élaboration en laboratoire de matériaux nouveaux par la mise au point de procédés de fabrication et de mise en forme adaptés. Pour les matériaux métalliques à moyen et fort tonnage, les recherches visent à éliminer les inclusions néfastes, contrôler l'homogénéité du matériau, mettre en forme par coulée directe des produits minces, et prendre en compte l'aspect procédé-environnement. Les matériaux nanocristallins connaissent un engouement mondial et constituent un créneau particulièrement exploré en sciences des matériaux. Les domaines qui peuvent être ras en avant concernent la métallurgie de préparation de poudres (mécanosynthèse ou procédé sol-gel) et des procédés de compactage qui conservent au matériau la struc-



ture nanocristalline. Le développement des matériaux composites dépend très fortement de la maîtrise des procédés d'élaboration. Les composites à matrices céramiques sont un champ particulièrement ouvert aux procédés évoqués précédemment. La production de matériaux macromoléculaires constitue une activité industrielle croissante, dont le volume total est du même ordre que celui des matériaux métalliques. Plastiques de grande diffusion ou systèmes pour la haute technologie viennent se substituer à des matériaux inorganiques (textile, pneumatique, adhésifs, matériaux biologiques), la chimie apportant toujours de nouvelles structures, de nouvelles fonctionnalités et de nouveaux potentiels (thermotropes, alliages, copolymères, polymères associatifs, polymères conducteurs, fullerènes dopés). Au-delà des polymères, on peut remarquer l'intérêt des matériaux mous en général, qui incluent aussi les milieux dispersés. En effet, beaucoup de substances sont utilisées à l'état fluide ou pâteux, et pratiquement tous les matériaux (métaux, béton, céramiques, etc.) sont travaillés dans cet état qui constitue une phase essentielle de leur fabrication.

Les problématiques actuelles du génie civil s'articulent autour *des* questions d'environnement et de sécurité, des interactions, de la représentativité des échantillons et des effets d'échelle. Une meilleure connaissance et une meilleure modélisation du sous-sol (connaissances géo- et hydrologiques, comportement à long terme), corrélation entre les propriétés *in situ* et au laboratoire, ainsi que le développement d'auscultation sur site réel sont nécessaires. Les thèmes en émergence sont relatifs à de nouvelles classes de charges liées à l'environnement, à de nouveaux matériaux (béton haute performance, sols renforcés), aux tunneliers, aux approches probabilistes, aux questions d'assemblage et de jonction, à la localisation des déformations, aux charges cycliques et aux logiciels 3D performants. Un point important reste la validation et l'expérimentation en vraie grandeur (auscultation, capteur, fibre optique).

En génie acoustique, une des grandes thématiques actuelles est celle des problèmes inverses :

analyse de la signature acoustique des sources ou des milieux de propagation, contrôle des sources, Les applications relèvent de l'imagerie médicale, du sondage du sous-sol ou des fonds marins, du contrôle non destructif des matériaux, du contrôle actif des bruits ou vibrations, de la modélisation des sources de bruit. Parmi les thèmes en émergence, on peut citer : la propagation en milieux complexes, les interactions fluide-structure et acoustique-turbulence, l'acoustique non linéaire, les méthodes numériques pour les problèmes directs et inverses, le traitement des signaux, les nouveaux transducteurs (capteurs numériques intégrés, microphones subminiatures, méthodes photoacoustique et photothermique impulsionsnelles, optoacoustique), la perception des sons naturels et la reconnaissance de la parole.

La conception d'appareillages et de systèmes électrotechniques associant dispositifs et organes de contrôle-commande est une des grandes tendances du génie électrique. On constate une évolution vers la recherche de la performance en termes de rendement (étude des pertes), de fiabilité (commande sécuritaire), de réduction de volume (intégration matérielle et fonctionnelle, d'accroissement des couples et puissances par unité de masse), et de fonctionnalités plus complexes grâce aux microprocesseurs. Ces préoccupations renforcent l'importance des travaux en cours sur les composants semi-conducteurs de puissance. Les actions de recherche sur les matériaux diélectriques et magnétiques et les composants associés doivent faire l'objet d'une forte croissance. Les actions interdisciplinaires avec l'automatique et l'informatique sont fortes. Des élargissements à la microélectronique, la mécanique et à la thermique sont à prévoir. L'avenir plus lointain se construit autour des microtechnologies, de la supraconductivité, des matériaux composites, du stockage de l'énergie, des lanceurs électromagnétiques...

le rôle de la simulation numérique est maintenant essentiel dans la plupart des génies avec une référence particulière aux génies mécaniques (structure, fluide, matériaux), thermique et électrique. La modélisation numérique est aussi bien utilisée par

le théoricien pour la validation de modèles que par l'expérimentateur pour la simulation et la mise au point d'expériences. Elle s'appuie sur des rapports privilégiés et anciens entre mécaniciens et mathématiciens. Le retard initial dans ce domaine a été rattrapé mais l'effort doit rester soutenu, qu'il s'agisse des hommes ou des équipements. Le transfert des méthodes entre les laboratoires et le milieu industriel est bien amorcé, avec toutefois une présence trop modeste dans le domaine des grands codes de calcul commerciaux. La qualité d'un code de calcul se mesure autant à ses performances calculatoires qu'à sa fonctionnalité et sa convivialité. L'élaboration de ces produits logiciels nécessite également la prise en compte des aspects cognitifs ou ergonomiques. Les progrès quotidiens et révolution rapide des matériels ont pour conséquence une grande diversité des produits : grands codes de calculs, programmation parallèle, mais aussi banalisation des logiciels pour ordinateur de bureau. La situation du génie logiciel sur quelques points clés est la suivante.

Au niveau des bases de données (relationnelles ou orientées objets, classiques ou multimédia, base de données déductives), les méthodes existantes restent faibles pour la conception des très grandes bases (utilisation de niveaux, mélange de relationnel et de hiérarchique). Ce problème sera peut-être résolu par l'utilisation plus massive de bases de données orientées objet avec des méthodes de conception *ad hoc* : évolution de Merise, de Hood, ... La France est très présente dans le domaine de l'Intelligence Artificielle : systèmes experts dans tous les secteurs, propagation de contraintes, réseaux de neurones, robotique. Le point faible est souvent l'acquisition des connaissances de l'expert, et des travaux en liaison avec le génie cognitif devraient s'intensifier.

L'arrivée de machines multiprocesseurs permet l'accès à la programmation du parallélisme vrai. Les ordinateurs de demain seront parallèles et il existe peu d'outils d'aide à la parallélisation. Un effort important devra être fait dans ce domaine, car il s'agit de repenser non seulement l'algorithmique, mais plus généralement les méthodes et même les modèles.

Une des missions du génie logiciel est également de faire communiquer entre eux des opérateurs de nature différente (algorithmes, visualisation, consultation de base de données) et des matériels de niveaux différents (serveur, micro, station, gros calculateurs). Il s'agit, dans le premier cas, d'architecture de logiciels où des efforts restent à faire pour les langages machines outils, robots, et, dans le second cas, d'architecture et de gestion de réseaux dont la qualité conditionne l'efficacité de l'outil informatique.

D'une manière générale, outre son développement propre et celui de ses produits que nous venons d'évoquer, l'informatique sous ses aspects conceptuels de calcul s'intègre désormais aux phases de modélisations dans de nombreuses disciplines. Outre les sciences pour l'ingénieur où cette interaction est très forte, d'autres secteurs sont nouvellement concernés : on soulignera, par exemple, le rôle particulier des interactions biologie/informatique en génétique moléculaire et pour les cartographies du génome.

Le génie biologique et médical concerne la mise au point d'objets et de méthodes appliqués à la santé : connaissance, évaluation, prévention, diagnostic, traitement. Fortement interdisciplinaire, il est à l'interface de plusieurs champs d'action (Sciences de la Vie, Sciences pour l'Ingénieur, etc.), de plusieurs techniques et méthodologies (informatique, traitement du signal, microélectronique, robotique, instrumentation), et de plusieurs formations. Ces frontières et limites imprécises expliquent le nombre de recherches souvent rattachées au génie biologique et médical. Il est donc important d'en souligner les grandes lignes de force actuelles ; biomécanique et biorhéologie, biocapteurs, biomatériaux, imagerie médicale ainsi que quelques développements liés aux besoins de l'analyse biologique clinique et du génie génétique.

En génie biotechnologique, les points de blocage majeurs pour l'application de la transgénèse animale à l'élevage sont d'une part le faible taux de naissances d'animaux transgéniques et d'autre part l'absence de marqueurs génétiques fiables et de li-

gnées de cellules embryogènes, indispensables pour la recombinaison homologue des gènes transférés. L'effort de recherche sur les animaux domestiques se porte principalement vers les manipulations d'embryons, la mise au point de lignées cellulaires embryogènes et de techniques de transfert de gènes, ainsi que vers le développement de cartographies génétiques.

Dans le monde végétal, on sait pour beaucoup d'espèces manipuler *in vitro* des cellules ou des tissus, puis régénérer la plante (propagation de plants sains, production de métabolites secondaires, sélection et multiplication de génotypes plus performants). La diversité des méthodes de transformation disponibles est un atout supplémentaire par rapport à la transgénèse animale. Les applications à l'agriculture dépendent maintenant de la caractérisation de gènes intervenant directement sur des caractères agronomiques. Plusieurs voies sont explorées, la gestion de l'azote par la plante, la stimulation des réactions de défense, et l'amélioration des teneurs en protéines, lipides ou polysaccharides de réserve.

Dans le domaine des applications à la chimie, il est nécessaire de porter l'effort sur l'amélioration des connaissances des biocatalyseurs (enzymes, abzymes, microorganismes entiers) et de leur mise en œuvre, éventuellement dans des conditions opérationnelles très différentes des conditions physiologiques. L'inventaire des biocatalyseurs et des réactions exploitables devrait d'ailleurs être poursuivi. Le couplage avec l'amélioration génétique des microorganismes, orienté vers l'obtention de biocatalyseurs plus performants, a été à peine abordé et devrait constituer une future priorité de recherche.

Le champ du génie urbain correspond à l'ensemble des services urbains en réseau ou utilisant le réseau de voirie. On doit aujourd'hui gérer beaucoup plus finement l'interface offre-demande, ce qui implique des disciplines relatives non plus seulement aux tuyaux mais aussi aux flux qu'ils véhiculent; par exemple, pour les réseaux d'eau, on passe de l'hydraulique à l'hydrologie et à l'hydrogéologie.

En génie Industriel, les problèmes abordés relèvent de la conception, de la planification, de l'exploitation d'une unité de production, ainsi que de l'organisation des flux entre unités de production, Estimation des coûts, études de rentabilité, choix d'investissements, mais aussi élaboration de stratégies industrielles, place à accorder au travail et moyens de mobiliser les ressources humaines sont concernés.

Dans ces types de génies (urbain, industriel, de l'environnement) situés dans le prolongement des génies des Sciences pour l'Ingénieur vers les Sciences Humaines et Sociales, deux tendances nouvelles sont à prendre en compte. Il s'agit d'une part de développer les concepts, les critères et les méthodes propres à ces génies à forte composante socio-économique en constitution, et d'autre part de les introduire dans les génies déjà constitués qui relèvent des Sciences pour l'Ingénieur (génies mécanique, civil, thermique, des procédés, électrique,...).

## SITUATION, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Il faut d'abord souligner l'aspect extrêmement positif pour l'ensemble des disciplines concernées des actions structurantes, fédératives et transdisciplinaires du CNRS qui conduisent au rapprochement de plusieurs communautés (PIRMAT, PIRSEM, PIR-Ville, GRECO Grandes Déformations et Endommagement, GRECO Calcul des Structures et Intelligence Artificielle,...) et/ou à l'identification claire d'un champ (GRECO Polymères, TIFAN pour les fluides alimentaires, GRECO Géomatériaux, GDR réseaux,...). Ces actions, appréciées par l'ensemble de la communauté et à rayonnement international, sont à maintenir, voire à renforcer.

Toutefois, la mise en place de structures lourdes ne doit pas rester la seule voie d'intervention pour développer un domaine scientifique.



## GÉNIE DES PROCÉDÉS CHIMIQUES ET PARACHIMIQUES

Sur le plan scientifique, malgré sa faiblesse numérique, l'école française de génie chimique est reconnue et appréciée dans le monde. En donnant la priorité aux recherches proches des processus de transformations, le génie des procédés n'a pas encore tiré tout le parti du contexte de qualité de la recherche théorique en France (mathématique, informatique, automatique, physique). La structure de la recherche publique, associant grands organismes (CEA, IFP) et Université, et développant des collaborations directes avec l'industrie, devrait faciliter l'émergence de pôles généralistes puissants, mais aussi d'équipes spécialisées de pointe. Mais la faiblesse de la recherche industrielle française, sa réticence à investir considérablement dans la recherche universitaire ne permettent pas de tirer le meilleur parti de cet avantage.

Les efforts d'organisation de la communauté de génie des procédés, effectués ces dernières années commencent à porter leurs fruits, il faudra néanmoins monter encore beaucoup en puissance pour nous comparer à nos grands voisins. On peut évaluer à environ 400 le nombre de chercheurs et enseignants en génie des procédés, dont seulement une soixantaine au CNRS, (essentiellement au SPI) et à 300 le flux annuel d'ingénieurs formés dans cette discipline. Cette faiblesse quantitative et organisationnelle tient en partie au découpage des disciplines, et en partie également à une réticence à l'égard des structures et à un manque de mobilisation.

Cependant, le succès du terme et du concept "génie des procédés" est aussi générateur de confusion. Il tend à recouvrir un ensemble vaste de génies, signe d'une ouverture encouragée par le rapport Gaillard, et il convient d'identifier par discipline les soutiens injectés afin de préserver la thématique globale du génie des procédés.

La priorité devra être donnée au développement et à la structuration des nouveaux pôles de

formation et de recherche recommandés également par le rapport Gaillard, à Lyon, à Grenoble, en région parisienne et sur le pourtour méditerranéen. D'autres noyaux plus petits mais performants sur des domaines spécifiques doivent être encouragés. Les deux pôles principaux de Toulouse et de Nancy, s'ils doivent essaimer et contribuer au développement des autres pôles, ne doivent pas en être affaiblis pour autant, et les départs doivent être compensés. Le pôle de Compiègne doit être conforté en permanents, en visant sans doute à terme une reconnaissance CNRS. Il y a lieu, parallèlement à un flux de recrutement raisonnable, de favoriser et d'organiser des actions de conversion ou de réorientation.

L'apport attendu du génie des procédés chimiques et parachimiques à des thèmes en essor comme l'environnement et la sécurité doit être reconnu et développé en tant que tel Ceci passe, là encore, par l'affectation de moyens nouveaux et spécifiques, et ne saurait résulter seulement de la réorientation de moyens existants.

## GÉNIES MÉCANIQUES, GÉNIE DES MATÉRIAUX ET GÉNIE THERMIQUE

Pour ces génies, le domaine couvert est très vaste, ce qui constitue à la fois une force et une faiblesse. Pour commencer, on notera, parmi les forces, l'envergure européenne qu'a pris *le Journal de Mécanique Théorique et Appliquée* en devenant *le European Journal of Mechanics*.

En mécanique des fluides, les équipes sont nombreuses, bien structurées, de réputation internationale tant sur le plan théorique qu'expérimental. Il existe incontestablement une école française dans le domaine de la turbulence qui se distingue tant par la métrologie fine que par les simulations numériques. Les grands moyens d'essais doivent être maintenus au meilleur niveau et être complétés par les moyens de mesure extrêmement perfor-

mants que produisent les progrès de la physique et particulièrement de l'optique cohérente.

La thermique bénéficie également d'équipes d'excellence, qui méritent d'être renforcées; elle doit conjurer une certaine dispersion des efforts. La mécanique des fluides, comme la thermique, bénéficie largement de la compétence et de l'efficacité des numériciens. Leurs moyens expérimentaux, d'essais et de diagnostic, méritent d'être renforcés. Le renforcement de la synergie fluides-thermique-combustion est souhaitable.

Les thèmes de recherche qui doivent connaître un développement particulier sont notamment :

- l'aérodynamique instationnaire, l'aérodynamique à grande vitesse (super et hypersonique),
- le couplage entre écoulement et vibration des structures,
- la modélisation de la turbulence, où la France a une place à prendre,
- la mécanique des fluides complexes et polyphasiques,
- la caractérisation thermique des matériaux hétérogènes, les phénomènes de transfert couplés,
- la maîtrise des champs thermiques et l'optimisation des échanges,
- la relation thermique-transport-environnement

En mécanique des solides, hormis les thèmes matériaux et calcul des structures, domaines où la France occupe une place reconnue au niveau international, la discipline génie mécanique est relativement peu développée par rapport à la situation rencontrée dans d'autres pays (Etats-Unis, RFA, Japon). Cette constatation est particulièrement valable pour le CNRS puisque, dans l'enseignement supérieur, le nombre de postes en génie mécanique créés ces dernières années a été relativement important. L'insuffisance provient sans doute aussi

d'une croissance faible des centres techniques créés après la seconde guerre mondiale. L'industrie mécanique de transformation des métaux ne dispose pas de l'équivalent des centres de recherche appliquée que sont les interfaces allemands. Faute de voir les centres techniques existants jouer convenablement leur rôle et se situer en complémentarité - et non en concurrence - de la mission de recherche des laboratoires universitaires et CNRS, les entreprises solides et averties dialoguent directement avec les laboratoires, et la majorité du secteur d'entreprises de taille plus modeste reste en dehors du circuit.

La recherche en génie mécanique nécessite des moyens lourds (machines-outils, informatique, plate-forme d'essais) ne pouvant être justifiés que dans le cadre d'équipe à taille suffisante (chercheurs et ITA). Il convient de favoriser les regroupements, les synergies des laboratoires publics et des écoles d'ingénieurs avec les centres techniques et les laboratoires de recherche privés afin d'associer les réalisations de technologie mécanique avec les préoccupations scientifiques de modélisation.

Il convient de développer fortement les études liées à la conception et à la fabrication de mécanismes faisant parties des machines (CAO machines) ainsi que celles permettant d'appréhender le comportement global des machines. Cette action volontariste doit se faire en maintenant l'effort dans le domaine de la rhéologie au sens large et en développant des actions structurantes dans le domaine du calcul des structures (chocs, vibrations...) et des études expérimentales globales. Elle passe aussi par le développement d'outils de modélisation géométrique adaptés aux structures mécaniques complexes.

Les thèmes en émergence sont relatifs :

- aux interfaces à différentes échelles (interaction outil-matière, multimatériaux, assemblage, état de surface, interface de résolution atomique),
- aux matériaux et structures intelligentes (ou actives),

- au contrôle non destructif des produits et des structures,

- au couplage fluide-structure,

- à la rhéologie des polymères à l'état solide.

Le développement des matériaux est mis aujourd'hui parmi les toutes premières priorités des pays industrialisés. Il est souhaitable de privilégier des recherches qui, s'appuyant sur la compréhension des processus physico-chimiques, mécaniques et thermomécaniques développent une approche micro-macro et phénoménologique. Des verrous restent à lever, et ceci nécessite des regroupements pluridisciplinaires. La spécificité de la démarche "rhéologie de la matière en écoulement" se doit d'être soulignée sous ces aspects pluridisciplinaires en ce qui concerne les polymères. La recherche sur la matière molle remporte des succès, mais il lui reste à se faire identifier en tant que telle dans les génies.

Enfin, il est nécessaire de considérer concrètement qu'augmenter les performances des matériaux existants ou favoriser l'émergence de matériaux nouveaux passe au moins autant par les conquêtes menées en terme de procédés d'élaboration de transformation et de traitement que **par** les découvertes sur la conception du matériau lui-même. L'effort de recherche sur les procédés d'élaboration est insuffisant en France et mal reconnu (le Japon constitue très souvent la référence). Il y a lieu de mener une action dans ce sens en interaction étroite avec les industries concernées et un travail simultané sur le matériau et sur son élaboration. La mécanique des matériaux souffre d'une profonde carence en matériaux d'étude qui doivent être disponibles en quantité suffisante, bien caractérisés et produits avec une souplesse qui permette d'en faire varier les paramètres. L'interaction forte entre mécaniciens et élaborateurs est une condition à l'amélioration des matériaux de structure : ceci passe par la mise en place d'un réseau d'élaborateurs regroupant universitaires, grands organismes et industriels.

## GÉNIE CIVIL

Les forces du génie civil dans le contexte international sont relatives à la modélisation, à l'expérimentation en laboratoire sur échantillons et sur structures (CEA). Les ministères participent directement à l'effort de recherche. Par contre, et il s'agit là d'une faiblesse, le secteur privé est peu engagé dans un effort de recherche (la situation au Japon est bien différente). Quant au rôle du CNRS, nous avons déjà noté les GRECO, PIRMAT et PIR-Ville, et il faudra être attentif aux demandes d'association de qualité dans ce domaine.

Les thèmes porteurs à soutenir sont la sécurité et les performances des structures dans leur environnement (couplage), les matériaux nouveaux du béton, les sols renforcés (géotextiles, géomembranes), les matériaux locaux (se focaliser sur des exemples plutôt que sur les théories abstraites), les ouvrages souterrains, le contrôle actif des structures par des procédés antivibratiles ou antibruit, la question des charges accidentelles.

## GÉNIE ACOUSTIQUE

La force principale de la recherche réside dans de bonnes capacités d'analyse et de modélisation des situations physiques réelles. La principale faiblesse est l'insuffisance du transfert technologique vers l'industrie provenant en partie de la faiblesse du secteur industriel dans certains domaines (ultrasons médicaux par exemple) et de l'absence de centres de transferts déjà évoquée. L'engagement des laboratoires et industriels français dans les programmes européens reste insuffisant.

Au plan de la lutte contre le bruit et les vibrations, il faut intensifier les actions portant sur la connaissance des mécanismes de génération du bruit (d'origine "solidienne" en particulier), les couplages fluide-structure et bruit-turbulence, le contrôle actif acoustique et vibratoire en situations réelles, les matériaux adaptatifs (dits "intelligents")



pour lesquels des avancées rapides sont actuellement observées à l'étranger. D'une manière plus générale, il faut intensifier toutes les recherches qui contribuent à la connaissance et au contrôle de l'environnement sonore, depuis les aspects physiques et mécaniques jusqu'à ceux qui relèvent de la psycho-acoustique et des sciences humaines.

Au plan du sondage acoustique, il faut encourager une synergie sur les problèmes de modélisation et d'inversion de données entre les divers domaines concernés : contrôle non destructif, imagerie médicale, sondage sismique, scanner, sonar.

## GÉNIE ÉLECTRIQUE

Le génie électrique a été affiché discipline prioritaire ces dernières années et cela a permis une structuration de la discipline et de la communauté (passage de 3 à 6 DEA en deux ans). On compte environ 40 chercheurs (8 unités sous tutelle CNRS réparties inégalement sur le territoire), 140 enseignants-chercheurs et 200 thésards. Cette politique de recrutement doit être poursuivie afin d'aboutir à un doublement d'ici à l'an 2000, la participation à des actions européennes reste relativement limitée. La petite taille des laboratoires français est un facteur de limitation pour une politique internationale réellement significative. La priorité donnée aux relations avec les partenaires industriels nationaux (justifiée par l'importance économique et exportatrice de cette industrie) est un autre facteur de limitation. L'élargissement de la communauté devrait permettre la création d'une revue scientifique en langue française qui fait actuellement fortement défaut.

L'effort de formation à la recherche des diplômés ingénieurs doit s'accroître au sein des laboratoires universitaires afin d'aider les industriels du génie électrique à s'adapter aux mutations technologiques en cours. L'enjeu économique est d'autant plus sensible que l'industrie du génie électrique est fortement exportatrice. Il faut créer plus de cadres scientifiques dans des secteurs où les spécialistes sont en nombre insuffisant.

## GÉNIES BIOLOGIQUES

L'existence simultanée d'un système de santé de qualité et de compétences scientifiques de haut niveau constituent la force du génie biologique et médical. La difficulté d'exploiter simultanément ces deux potentiels est en revanche une faiblesse. En effet, la possibilité d'intégrer les non-médecins dans les secteurs hospitaliers est insuffisamment exploitée, les structures de rencontre sont insuffisantes. Enfin, le tissu industriel est inconsistant dans le domaine du génie biologique et médical. Les champs d'action forts doivent être soutenus (biomécanique, biocapteurs biomatériaux, imagerie médicale). Les nouveaux champs d'action doivent être identifiés (génie génétique). Les collaborations étroites avec d'autres disciplines doivent être renforcées (micro-électronique, traitement du signal). Il convient surtout que des équipes interdisciplinaires établissent des cahiers de charges, pour une finalité bien évaluée, qui reste la santé et ses contraintes. Cette interdisciplinarité doit se manifester par des structures et des actions concrètes qui doivent absolument valoriser les chercheurs qui en seront les auteurs (évaluation, promotion).

En Europe, les problématiques du génie biotechnologique sont traitées dans de grands instituts réunissant plusieurs centaines de personnes. En France, l'association des différents dispositifs (CNRS, INRA, ORSTOM, IFREMER, Universités) ne fonctionne pas de façon optimale. Dans le domaine des biotechnologies marines, par exemple, il n'y a pas de stratégie commune à opposer aux efforts des Etats-Unis et du Japon malgré l'importance des enjeux à moyen terme. Les génies biotechnologiques occupent une place à part, en raison de leurs liens organiques avec les sciences biologiques. En premier lieu, il convient de sensibiliser davantage les biologistes et le CNRS aux retombées socio-économiques de ces travaux. Les collaborations entre organismes doivent être encouragées afin de favoriser le développement d'instituts de biotechnologie. C'est le cas notamment du domaine végétal, pour lequel par exemple une réflexion sur le pôle Gif-Orsay-Versailles est nécessaire, et des pro-

ductions marines, où le fossé entre connaissances fondamentales et problématiques appliquées est particulièrement profond.

## LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Son développement et son utilisation sont essentiels pour les génies mécaniques en particulier, mais aussi thermique ou électrique. Au-delà d'une simple utilisation d'outils, il s'agit d'une réelle démarche de modélisation qui demande un profil de formation adapté, s'appuyant sur une bonne liaison avec les analystes numériques, les mathématiciens et les informaticiens. La qualité des modèles, des méthodes et des produits logiciels en dépend. Ces profils mixtes ont de la difficulté à se faire reconnaître, plus à l'Université qu'au CNRS d'ailleurs, car les commissions de spécialistes se renvoient volontiers les uns aux autres ce type de candidats, et ceci est grave. Le laboratoire de recherche est le lieu où doivent se développer les méthodes sophistiquées qui seront utilisées demain dans le milieu de production. Les phases de développement sont à confier à des partenaires industriels, ou à des sociétés de service avec lesquelles les liens sont à renforcer.

La mise en œuvre nécessite toujours l'utilisation communautaire de gros calculateurs par l'intermédiaire de réseaux et l'utilisation d'équipement local en stations de travail ou en micro ordinateur. L'évolution *des* matériels est rapide, et il est très important que le soutien du CNRS soit très fort pour ces équipements qui, comme les équipements expérimentaux, restent souvent prioritaires pour accompagner les avancées de la connaissance.

La part importante du calcul parallèle et sa généralisation pour les ordinateurs de demain impliquent qu'un effort soit effectué non seulement au niveau de la formation initiale à l'université ou dans les écoles d'ingénieurs, mais aussi au niveau d'une formation continue d'envergure pour la catégorie de personnels concernée.

## GÉNIES À FORTE COMPOSANTE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Le génie urbain bénéficie d'une situation favorable en France liée à la concentration de la gestion des réseaux entre les mains de grandes compagnies (Compagnie des Eaux, EDF, SNCF, RATP, Télécom), ce qui génère une capacité de réflexion au second degré. Néanmoins, la recherche publique n'est pas encore structurée sur ce thème et reste émietlée : Institut National de Génie Urbain à Lyon, éléments aux Ponts et Chaussées, Cette situation se retrouve pour le génie industriel avec un seul cursus complet à l'Ecole Nationale Supérieure de Génie Industriel à Grenoble et des compétences plus dispersées en sciences pour l'ingénieur (Nancy, Compiègne, ...) et en sciences économiques et sociales (Lyon, Strasbourg, Ecole des Mines de Paris, ...) alors que la reconnaissance de la discipline est bien plus forte à l'étranger (Suède, Etats-Unis, Allemagne, Japon). Compte tenu de la nature émergente de ces génies, il est souhaitable et nécessaire de constituer et de structurer un véritable milieu de recherche à leur propos respectif.

Pour le génie industriel, l'organisation d'un colloque interdisciplinaire pourrait lancer l'action d'une telle démarche. Pour le génie urbain, en plus du développement des aspects cognitifs déjà évoqués en relation avec les sciences de l'homme et de la société, l'effort devra porter sur le développement des sciences et techniques propres au génie urbain : modélisations transversales des réseaux, outils nécessaires à la gestion en temps réel, connaissances relatives à la production et à la maîtrise des flux, redéfinition des tâches à l'intérieur des services opérateurs en fonction des nouvelles données. On attend beaucoup du PIR-Ville pour reconstituer une interface entre les administrations responsables et l'offre publique de recherche. On souligne l'importance du renforcement de l'implication des collectivités locales dans ce processus, notamment, par la reconnaissance de la fonction et de la carrière des intervenants.

## LA FORMATION ET LES HOMMES

Les enjeux de formation concernent le renforcement des qualifications des cadres dans les centres industriels de recherche et de développement, les multicompetences pour les techniciens, les ingénieurs et les docteurs formés, la création de cadres universitaires dans des secteurs où les spécialistes sont en nombre insuffisant. La formation doit être de haut niveau et à caractère pluridisciplinaire sans négliger les aspects technologiques.

Elle doit intégrer une sensibilisation aux problèmes de pollution et d'environnement en général. Les enjeux sont importants car il est plus économique de réduire les nuisances à la source que de réhabiliter ce qui a été dégradé.

L'évolution extrêmement rapide des méthodes et des technologies, le développement de modèles théoriques ou numériques de plus en plus sophistiqués soulignent l'importance du rôle de la formation continue tout au long de la carrière. Un effort, auquel le CNRS pourra apporter sa contribution, devra être fait en France dans ce domaine.

Si le flux d'ingénieurs formés en sciences des génies est globalement satisfaisant, il faut noter un manque de techniciens d'une part et d'ingénieurs formés par la recherche (docteurs) d'autre part.

En génie acoustique, une sensibilisation au fait acoustique devrait être intégrée à la culture générale de base des cadres de demain. Pour les génies à caractère socio-économique (urbain, de l'environnement et industriel), la situation est plus grave puisque tout ou presque reste à faire en ce qui concerne à la fois la création de filières de formation et de reconnaissance de la fonction et de la carrière. La formation continue a un rôle particulier à jouer dans ce cas.

## CONCLUSION

Parmi les Sciences de l'Ingénieur, les génies sont des disciplines scientifiques à part entière qui nécessitent un soutien des pouvoirs publics de manière à maintenir un potentiel de recherche de formation de base essentiel dans ces disciplines d'accompagnement des transferts technologiques. Des enjeux économiques importants en dépendent dans le contexte européen et international.

Le département SPI est le cadre approprié au CNRS dans lequel ces disciplines peuvent s'épanouir et se développer en synergie. Sa place au CNRS doit être encore renforcée.

Au-delà de ces synergies internes, les Sciences de l'Ingénieur ont besoin de passerelles vers la plupart des autres disciplines et départements du CNRS. Pour que des projets transdisciplinaires se développent autour des génies des sciences pour l'ingénieur, il est nécessaire que des chercheurs provenant de la plupart des autres départements puissent collaborer sur des objectifs finalisés et voir cette activité reconnue.

**Michel Raous**

*Président du groupe 12*

*avec la collaboration de Jean Jenck*

*Jean-Pierre Lefebvre*

*Daniel Tondeur*



# 13

## LES ENERGIES DU FUTUR

### RESSOURCES, MAÎTRISE, TECHNOLOGIES, ÉCONOMIES, IMPACTS

#### LES NOUVEAUX ENJEUX

Dans les années soixante-dix, les recherches sur les techniques de production et de consommation d'énergie ont connu une impulsion notable dans les pays industrialisés afin d'apporter des réponses appropriées au problème de la sécurité énergétique et de la dépendance pétrolière. Elles se sont diversifiées en dehors du seul champ de la fission nucléaire, en particulier vers les nouvelles techniques pétrolières, la gazéification et la liquéfaction du charbon, les énergies renouvelables (biomasse, géothermie, solaire) et vers une multitude de projets dans le domaine des utilisations de l'énergie. Les effets les plus notables de ces recherches sont la diversification des sources d'approvisionnements pétroliers (accès à des zones difficiles), le progrès spectaculaire de la récupération du pétrole, celui des procédés de combustion du charbon et la réduction de l'intensité énergétique de l'activité économique, sans parler de l'amélioration des techniques nucléaires au plan de la sûreté. Les pays développés ont ainsi réduit d'un quart en moyenne la quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer une unité de produit intérieur brut.

Mais les efforts publics ont été sensiblement ralentis dans les années quatre-vingt à la suite de la

détente des marchés énergétiques internationaux et d'un certain désengagement des Etats aux bénéfices des forces du marché, ce qui a eu des effets parfois regrettables sur la poursuite de certains projets technologiques et sur la constance des efforts de maîtrise de l'énergie.

La réémergence de la sensibilité environnementale à la fin des années quatre-vingt, liée aux prises de conscience sur les questions de pollutions régionales et de changement climatique global, a amené à redéfinir les politiques énergétiques en faisant de la protection de l'environnement un critère de premier rang. Les émissions de CO<sub>2</sub> qui proviennent de la conversion et de l'utilisation de l'énergie contribueraient pour 55 % aux émissions anthropiques susceptibles d'accroître l'effet de serre, sans compter les rejets de méthane et les CFC utilisés en réfrigération. Le long terme, voire le très long terme, sont désormais les nouveaux horizons de référence de ceux des gouvernements qui se préoccupent de rechercher les conditions du "développement durable", notamment en anticipant les menaces de réchauffement global et d'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Les politiques de recherche-développement dans le domaine de l'énergie ont été relancées en conséquence sur la base de critères énergétiques et environnementaux étroitement intégrés et d'analyses prospectives de très long terme.

L'objectif de réduction de la dépendance pétrolière, dont la récente guerre du Golfe a rappelé l'enjeu, n'en est pas pour autant négligé, même s'il n'est plus le seul. Le problème potentiellement grave de la répartition géographique très peu homogène des ressources et du risque géopolitique qui s'y attache reste posé à moyen terme. Il prend le pas sur celui d'une raréfaction progressive des ressources qui se manifesterait probablement par une stagnation de la production mondiale de pétrole dans les prochaines décennies.

A très long terme, les défis énergétiques et environnementaux sont immenses avec le développement espéré des pays du Sud à la démographie galopante, avec l'épuisement probable des sources de combustibles bon marché, avec l'impact cumulatif probable des consommations de ressources fossiles sur le climat de la planète, et avec la possibilité d'un refus persistant de développement de l'énergie nucléaire dans nombre de pays. De plus, les ruptures technologiques majeures qui pourraient constituer des réponses à la taille du problème énergétique de long terme (fusion thermonucléaire contrôlée, géothermie des roches sèches, satellites solaires de grande taille), n'auront probablement pas d'impact notable avant la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.

Aucune technique ne pouvant être considérée comme la solution potentielle unique au problème de long terme, le défi à relever passe par le recours à une pluralité technologique accordant une place centrale à la maîtrise de l'énergie, au recours progressif aux énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, vent) et à l'énergie nucléaire si elle est mieux acceptée et bien maîtrisée. Les efforts technologiques doivent aussi prendre en compte le caractère désormais inséparable des critères habituels de politique énergétique et de protection de l'environnement.

L'objectif de ce rapport n'est pas de construire un programme d'actions en établissant des priorités entre différents domaines, mais d'identifier des recherches à maintenir, à développer ou à encourager dans les divers Départements et Pro-

grammes du CNRS pour œuvrer en ce sens, en continuité avec ce qu'a entrepris le PIRSEM (1) depuis 1982.

## ETAT ET EVOLUTION DES THEMES DE RECHERCHE

Les recherches actuelles visent des horizons différents : le moyen Terme pour l'amélioration des techniques actuelles d'exploitation et de conversion des sources classiques et des techniques d'utilisation, le très long terme pour les sources futures susceptibles de contribuer massivement à l'approvisionnement mondial en contournant les contraintes d'environnement et de ressources épuisables.

### 1 - LES SOURCES CLASSIQUES

Les sources classiques d'énergie (charbon, gaz naturel, pétrole) et la fission nucléaire sont encore appelées à occuper une place primordiale dans le bilan énergétique mondial à long terme. Cette place pourrait être de 60 % au milieu du siècle prochain, dont 10 % et plus pour la fission si elle n'est plus contrainte par le problème d'acceptation sociale. Le gaz connaîtra probablement un développement notable du fait de ses qualités importantes d'utilisation. Dans le domaine de l'exploitation des ressources de combustibles, la progression des techniques a deux objectifs : d'une part diminuer les coûts de prospection des gisements et de récupération des hydrocarbures, d'autre part rendre le recours aux combustibles classiques compatible avec les normes environnementales, rendues plus sévères lors de leur extraction, de leur transformation et de leur utilisation. Le rôle du charbon pour-

(1) PIRSEM ; Programme Interdisciplinaire de Recherche sur la Science pour l'Energie et les Matières Premières du CNRS.

rait se maintenir si on parvient à diminuer ses effets polluants, notamment en l'utilisant après gazéification et liquéfaction, sans que cela résolve pour autant le problème des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans le domaine de **l'amont pétrolier et gazier**, le développement de nouveaux moyens techniques doit permettre une réduction des coûts de l'exploration et une meilleure accessibilité à l'ensemble des ressources, dont les pétroles "frontières" tels que le pétrole de l'off-shore profond avec les complétions sous-marines télécommandées. Trois types de progrès sont à attendre : le développement d'une sismique nouvelle plus précise, la modélisation mathématique des bassins avec intégration des composantes géologiques, géophysiques et géochimiques, et l'amélioration des techniques de récupération.

Des recherches plus fondamentales doivent se poursuivre en géodynamique et en géochimie : paléographie des zones de production de matière organique et d'accumulation sédimentaire, mesure de l'évolution des matières organiques dans les sédiments récents, mécanismes d'expulsion ou de rétention des gouttelettes d'huiles au sein des roches-mères, étude particulière de certaines matières organiques à grande réactivité. La recherche géodynamique française se situe à un très bon niveau grâce aux entreprises pétrolières et à l'IFP. Mais, au niveau du CNRS, il convient d'encourager plus clairement les études pétrologiques et expérimentales du comportement des roches-mères au cours de la genèse et de la migration des huiles. La recommandation du précédent rapport (création d'un groupement de recherches sur le thème "relations et processus organo-minéraux en environnements sédimentaires") est toujours d'actualité.

Par ailleurs, la compréhension de l'architecture des gisements (géologie et géophysique des réservoirs) et l'amélioration des connaissances des lois physiques qui contrôlent leur comportement dynamique permettent de développer des modèles plus performants, réduisant ainsi les coûts de prospection, d'exploration, de développement et de récupération assistée. Les études menées sur la pro-

pagation des fractures et les écoulements en milieu fracturé par le PIRSEM (programme géothermie profonde) pourraient être mises à profit pour l'amélioration de l'exploitation de certains réservoirs. Le CNRS doit aussi être présent dans des domaines encore plus en amont : la physique de base du milieu poreux, les additifs chimiques ou tensioactifs. Des recherches sont effectuées actuellement sur l'utilisation des polymères hydrosolubles et des microémulsions en récupération assistée, dans le cadre d'un groupement scientifique (GS) constitué par le PIRSEM avec l'ARTEP (2) (CFP, Elf France, IFP et GDF), et qui implique 16 laboratoires CNRS. D'autres recherches conduites dans ce GS portent sur la thermodynamique des fluides de gisements et sur la physico-chimie des interfaces. Un dernier volet des recherches doit s'attacher plus particulièrement au traitement des rejets (fluides de forage, boues huileuses) et à la lutte contre les pollutions accidentelles des eaux et des sols contaminés, notamment avec des microorganismes. De telles études sont en développement au PIRSEM.

Dans le domaine de la **fission nucléaire**, les recherches dans le monde portent principalement sur l'amélioration de la sûreté des techniques existantes de réacteurs et du cycle du combustible associé (enrichissement par lasers, stockage des combustibles et des déchets, séparation poussée des produits de fission) et sur la conception de réacteurs intrinsèquement sûrs qui reposent sur des éléments de sécurité passive (inertie du circuit primaire, puissances spécifiques du cœur plus faibles, etc.). Dans les pays où le nucléaire est confronté à un problème d'acceptation sociale, on considère que ces réacteurs seront la réponse technologique à ce problème. Les filières "nouvelles" d'autrefois (réacteur HTR, surgénérateur rapide) font l'objet d'un désinvestissement notable dans la plupart des pays industrialisés, faute de nécessité, sauf au Japon où la recherche du leadership mondial dans le domaine nucléaire civil s'accompagne d'un affichage d'objectifs technologiques multiples. La situation in-

(2) ARTEP : Association de Recherche sur les Techniques d'Exploitation du Pétrole.



temationale du nucléaire est telle qu'elle devrait amener à rectifier un jour certains objectifs de la politique technologique française, pour participer notamment à la mise au point d'une technique de réacteurs intrinsèquement sûrs, faute de quoi l'industrie française pourrait perdre sa position actuelle lors de la relance des programmes nucléaires. La recherche de coopération européenne s'imposerait.

Récemment de nouveaux systèmes de production d'énergie utilisant la fission nucléaire ont été envisagés. Ces systèmes associent des accélérateurs de protons de 1 à 2 GeV d'énergie de très haute intensité, à des ensembles sous critiques. Ils pourraient produire de l'énergie à l'échelle comparable à celle des réacteurs industriels actuels, sans risque d'emballement, avec un inventaire de produits radioactifs environ cent fois plus faible que celui de ces réacteurs. Ils pourraient également brûler leurs propres déchets nucléaires et éventuellement ceux des réacteurs traditionnels. Les études sur ces systèmes en sont encore au stade conceptuel.

Les équipes CNRS sont très présentes dans certains domaines de la fin du cycle des combustibles : la chimie des transuraniens, la caractérisation des déchets en vue de leur conditionnement, leur enfouissement géologique. Il s'agit de contrôler le transfert possible des radionucléides contenus dans les colis de déchets jusqu'à la biosphère et les organismes vivants par l'intermédiaire d'espèces solubles dans l'eau ou entraînées par l'eau. Les recherches conduites par les radiochimistes ont pour but de comprendre la migration des radionucléides contenus en très faible concentration dans les eaux souterraines ou de surface. Cela nécessite d'aborder l'identification des espèces (dissoutes, colloïdales particulières) et l'étude des lois qui président à leur transport : diffusion, interaction avec les milieux hétérogènes complexes de la géosphère, passage dans le vivant. Les recherches portent aussi sur les problèmes de lixiviation des colis de déchets et sur les problèmes de transport à travers les barrières artificielles des stockages définitifs. L'IN2P3 examine la possibilité de travailler sur le problème de la transmutation des déchets par accélérateurs en re-

lation avec les objectifs de la loi de 1991 sur les déchets nucléaires.

Par ailleurs, l'intervention des géologues CNRS, qui est forte dans le domaine des gisements d'uranium, pourrait se porter davantage sur l'étude des projets de centres de stockage de déchets radioactifs au côté du BRGM (3) et de l'ANDRA (4). Les travaux déjà cités sur la caractérisation des propriétés hydromécaniques des fractures menées par le PIRSEM pourraient avantageusement être incorporés dans les études de confinement des cavités de stockage de déchets en milieux granitique.

## 2 - CONVERSION ET TRANSFORMATION

La conversion des sources classiques connaît de multiples évolutions technologiques visant l'amélioration des rendements, la substitution aux combustibles d'origine pétrolière et la limitation des impacts environnementaux.

### Les transformations classiques

Dans le domaine de la **production électrique**, les équipements en cycle combiné gaz/vapeur qui présentent des impacts environnementaux moindres connaissent une diffusion commerciale croissante, avec des rendements globaux et des tailles sans cesse en progression (55 % et 350 MW actuellement), grâce notamment au progrès dans les matériaux des turbines à gaz et dans les systèmes de régulation conjointe des deux cycles. Ces équipements utilisés en production combinée électricité-chaleur sont aussi la voie privilégiée de développement de la cogénération dans l'industrie, avec des rendements globaux de l'ordre de 80 %,

(3) BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières,

(4) ANDRA : Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs.

La maîtrise des turbines à gaz avec réinjection de vapeur (STIG) permettra d'atteindre des performances techniques et économiques comparables. Le recours à des aubes de turbines "monocristaux"<sup>11</sup> ou à "cristaux orientés" a permis la croissance de la tenue en température, en corrosion et en vitesse. Dans le futur, la maîtrise des céramiques à base de nitrure, carbure ou oxynitrure de Si et le recours à des revêtements de zircone permettraient d'accroître la température à 1350°. Cette évolution est conditionnée par le progrès des techniques de dépôts par plasma. On notera que d'autres moyens d'amélioration de la conversion en électricité, cycle supercritique, magnétohydro-dynamique (MHD), étudiées dans le passé, ne font guère l'objet de recherches en France et dans le monde.

Dans le domaine de la **conversion et de la combustion du charbon**, des efforts importants de mise au point de procédés de combustion propre (désulfuration des fumées, lit fluidisé circulant, lit fluidisé sous pression, gazéification intégrée à un cycle classique ou à un cycle combiné) ont été menés dans le domaine de la production électrique, notamment aux Etats-Unis et en Allemagne. Des recherches importantes ont été effectuées en France autour des centrales d'EDF et Charbonnages de France (CDF), en particulier à Carling avec le lit fluidisé circulant, pour lequel la technique française est bien placée. Les équipes CNRS et universitaires ont participé à la résolution des problèmes posés dans le cadre du GS Charbon jusqu'en 1990, avec des études sur la cinétique globale de la combustion et la turbulence. Ces recherches se poursuivront en liaison avec les "chaudiéristes" français et les Houillères de Provence, pour soutenir la position de l'ingénierie française à l'étranger.

En revanche, les recherches mondiales sur la gazéification et la liquéfaction du charbon ont eu tendance à marquer le pas au cours des années quatre-vingt. Il faut noter cependant la relance de l'effort sur les procédés de fabrication de méthanol par synthèse catalytique, aux Etats-Unis principalement.

Dans le domaine de la **conversion du pétrole**, le raffinage tend à devenir un véritable ensemble

pétrochimique propre. La diminution des teneurs réglementées en produits aromatiques et en soufre dans les carburants entraîne actuellement, pour la production d'essence, le recours à l'alkylation aliphatique et à l'isomérisation avec de nouveaux catalyseurs (acides solides), pour que ces procédés ne présentent pas de risque pour l'environnement (suppression du recours actuel à H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HF). A long terme, le recours croissant à des bruts plus lourds et à la conversion "profonde" avec des procédés aux conditions opératoires très sévères (volume réactionnel, température, pression) est une évolution inéluctable, mais difficile en raison de la forte concentration en hétéroéléments (soufre, azote) et en métaux (nickel et vanadium), et de leur viscosité importante. Des catalyseurs de type nouveau sont développés pour faire face à ces problèmes. Les progrès à effectuer concernent la catalyse hétérogène (avec catalyseurs hautement sélectifs), la séparation par absorption ou par membranes et la modélisation des procédés (études cinétiques, etc.). Les équipes CNRS interviennent activement dans les projets de TIFP et des compagnies de raffinage, en particulier dans le cadre d'actions soutenues par le PIRSEM. Dans le domaine du génie catalytique, la collaboration CNRS-industrie se concrétise par l'existence de deux unités mixtes (CNRS-Elf, CNRS-IFP).

La production de **carburants à partir du méthane** fait l'objet d'un effort particulier. La voie directe Oxydation dimérisante du méthane en éthane et éthylène) constitue un véritable défi scientifique en matière de mise au point de catalyseurs sélectifs. La compréhension des problèmes de conversion directe des alcanes nécessite aussi un important effort de modélisation. La maîtrise difficile de cette voie fait l'objet de recherches très actives dans le cadre de coopération bilatérale entre le CNRS et certains industriels.

## Générateurs et stockages électrochimiques

La recherche électrochimique est relancée depuis peu dans le monde sur les **piles à combus-**

**tibles** sous l'effet des politiques de lutte contre la pollution atmosphérique urbaine et l'effet de serre. Le Japon développe un pilote de 40 MW : 65 % de rendement, pas de pollution. Les piles à combustibles sont de plusieurs types selon, la nature de l'électrolyte (acide, alcalin, carbonate fondu, oxyde solide, polymère), celle du combustible utilisé (hydrogène, hydrocarbure, alcool, hydrazine, etc.), et en fonction de la température. Si les piles à acide phosphorique sont les plus développées, l'intérêt se porte pour le long terme sur les systèmes à carbonates fondus (650°) et à électrolytes solides (1000°), qui puissent utiliser le gaz naturel, le méthanol ou l'hydrogène. En France, les recherches en ce domaine sont faibles alors qu'il existe un potentiel important dans les laboratoires. La volonté de GDF d'étudier la mise au point d'une pile utilisant le gaz naturel dans le cadre d'une coopération avec le CNRS n'a pas encore pu se concrétiser. Cette initiative mériterait d'être fortement soutenue. A signaler également, dans le cadre du Programme "Véhicules Propres et Economiques" du MRT, le nouveau programme de recherche sur les piles à combustibles à hydrogène : il regroupe, dans le cadre d'une action PIRSEM, une dizaine d'équipes CNRS et d'Universités, au côté des constructeurs d'automobiles.

La recherche sur les **accumulateurs** se situe à l'articulation de l'électrochimie et de la chimie du solide. Elle porte sur de nouveaux matériaux d'électrodes (matériaux d'intercalation, polymères, hydrures), l'amélioration des électrodes classiques et l'étude du comportement des électrolytes et séparateurs. La recherche vise à diminuer les problèmes d'entretien et les temps de recharge, et à augmenter les énergies massiques, les densités de puissance, la cyclabilité et l'autodécharge, c'est-à-dire le poids et la durabilité des batteries. Les couples traditionnels Pb/PbO<sub>2</sub>, Ni/Cd, voire Ni/Fe, trop peu efficaces ou trop chers, sont toujours étudiés. On note un renouveau d'intérêt pour le couple Na/S (qui opère à 350° dans des batteries de stockage à grande échelle) et le couple Ni/Zn, l'émergence de batteries métal/air (Zn/air, Fe/air, Al/air), et le développement rapide des accumulateurs NI/H<sub>2</sub> utilisant des hydrures réversibles comme électrode négative et susceptibles de remplacer les batteries Ni/Cd.

La recherche porte également sur des systèmes plus performants à base de Li qui ont une énergie massique élevée et une faible autodécharge, qu'ils soient à électrolytes liquide ou solide. Elle porte sur les sulfures et oxydes lamellaires, les matériaux d'intercalation, la mise au point d'électrolytes stables vis-à-vis du Li et d'électrolytes solides. Plusieurs laboratoires du CNRS étudient ces questions avec des industriels, notamment en vue de réaliser un accumulateur tout solide en couches minces à base de polymères pour une utilisation dans les véhicules électriques.

## L'hydrogène, nouveau vecteur énergétique

Les avantages de **l'hydrogène** (absence d'émissions de CO<sub>2</sub>, vecteur énergétique plus maniable que l'électricité du fait de sa stockabilité) peuvent être surestimés si on oublie les impacts liés à sa production l'électrolyse à partir d'électricité d'origine classique ou nucléaire, coût des électrolyseurs). La photocatalyse - l'un des principaux procédés alternatifs - est explorée au travers des biotechnologies solaires. Les efforts dans ce domaine sont orientés actuellement vers la production de molécules à haute valeur ajoutée et le génie biochimique. Le transport de l'hydrogène, pour des raisons évidentes, nécessiterait aussi des progrès technologiques notables. On notera enfin, qu'outre ses usages traditionnels, le débouché privilégié de l'hydrogène serait la voiture équipée d'un moteur à combustion interne, d'une petite turbine ou d'une pile à combustible (voir *supra*).

## 3 - L'AMÉLIORATION DES TECHNIQUES D'UTILISATION DE L'ÉNERGIE

Souvent proches des limites imposées par les lois de la physique en raison des progrès réalisés antérieurement, les progrès dans les techniques de conversion ont été faibles, au contraire de ceux réalisés dans les techniques d'utilisation de l'énergie. De plus, *ces* derniers ont été bénéfiques pour l'en-



vironnement, et la marge de manœuvre en ce domaine reste importante.

## Les usages industriels

Le progrès de l'efficacité des techniques a été impulsé en partie par les politiques publiques, en partie par les stratégies commerciales fortes des équipementiers et des entreprises énergétiques, comme en témoigne l'exemple des torches à plasma développées par EDF dans la sidérurgie. Mais l'action publique n'a pas toujours pu combler les vides laissés volontairement par ces stratégies, dans les usages captifs de certaines énergies notamment.

L'amélioration des procédés existants ou la mise au point de nouveaux procédés dans les secteurs gros consommateurs (sidérurgie, chimie, pâtes à papier, etc) s'effectuent grâce au progrès en génie des procédés, en génie chimique ou en génie thermique. Dans les autres industries, le progrès se manifeste plutôt sous forme d'un front continu permis par l'amélioration générale des connaissances et des savoir-faire. Sans tomber dans l'inventaire, on peut distinguer deux grands types de progression : le développement des domaines transversaux de techniques génériques (séparation de phases, catalyse, etc.) et le progrès des composants (échangeurs thermiques, pompes à chaleur, recompression mécanique de la vapeur, etc.). Ces évolutions sont de plus en plus marquées par le critère environnemental

### tes techniques génériques

Il convient de citer ici :

- les procédés à haute température, avec les techniques de chauffage électrique (effet Joule, four à plasmas, micro-ondes, induction, infra-rouges) et les récupérateurs de chaleur (échangeurs, brûleurs avec récupérateurs et régénératifs, etc.);
- l'amélioration des méthodes thermiques : usage des énergies radiantes, techniques de séchage, etc., avec l'étude de la cinétique des séchages

des transferts de chaleur et avec la mise au point de logiciels de thermique;

- les techniques de séparation de phases avec des méthodes non thermiques (qui compte pour 20 % dans les besoins industriels) : membranes avec osmose inverse et microfiltration, extraction par fluide supercritique, absorption sous pression, perméation gazeuse qui en outre évite l'altération des produits séparés. Les membranes à trous sélectionnent les molécules en fonction de leur diamètre. Les membranes fonctionnalisées transmettent des ions ou des molécules par pervaporation; elles ne fonctionnent pas encore en tous milieux et méritent de faire l'objet d'un effort de recherche imponent;

- les techniques catalytiques, qui réduisent les consommations énergétiques, les rejets ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , contaminants organiques et métaux) et permettent en certains cas la récupération d'acides organiques (industries papetières). Utilisée en combustion, notamment du gaz naturel, la catalyse permet de limiter les réactions endothermiques à haute température ( $2000^\circ\text{K}$ ) et les productions toxiques ( $\text{CO}$  et  $\text{NO}$ ). Les industries du raffinage et de la chimie ont fait des efforts importants pour développer des "zéolithes", notamment pour la production pétrochimique et la réduction des oxydes nitrés;

- l'amélioration des techniques de transformation de la matière très énergivores, qui nécessite une compréhension en profondeur des phénomènes mis en œuvre. Des recherches sont effectuées, par exemple, sur des broyeurs par jets d'air opposés dans le cadre d'une ARC;

- l'utilisation industrielle des plasmas (électricité), qui se rencontre dans de nombreux procédés de traitement de surfaces (nitruration, dépôt de silicium, gravure microélectronique, durcissement par chocs lasers), ainsi qu'en métallurgie (plasmas d'arc ou de lasers pour le soudage, la découpe et le traitement thermique), ou encore, ce qui est nouveau, en métallurgie extractive pour la fusion, la projection et l'évaporation. Il en est de même pour la conversion des hydrocarbures et la production de composés (acétylène, oxydes d'azote);

- la conception et la gestion optimisée des procédés qui concernent les systèmes experts, la métrologie, les automatismes de régulation. La définition de logiciels de modélisation et d'aide à la conception et à l'exploitation est une piste de progrès importante.

### **Les composants**

Les **composants** de procédés industriels doivent également continuer de faire l'objet d'améliorations. On citera :

- les pompes à chaleurs à compression (PAC), dont la diffusion est gênée par des coûts élevés, des performances médiocres et l'emploi des CFC. Le recours à de nouveaux principes, de nouveaux fluides et cycles thermodynamiques, qui permettrait d'élargir le domaine d'application (haute température, stockage), doit être encouragé ; système à absorption gaz-liquide (LiBr-H<sub>2</sub>O), système à adsorption gaz-solide (zéolite-eau, etc.), système à réaction entre un gaz et un solide, ou entre un gaz et une solution. Des développements notables ont été réalisés par des équipes du CNRS qui devraient être fortement soutenues;

- les moteurs électriques et les transformateurs, qui peuvent être améliorés au niveau des pertes magnéto-mécaniques, par l'usage de matériaux magnétiques doux ou de plus haute qualité (ferrites doux et alliages conventionnels Fe-Si 3 %)- Vu l'enjeu industriel, l'industrie française devrait défendre ses chances plus résolument;

- le développement des supraconducteurs à température critique peu élevée (notamment l'alliage Nb-Ti) pour le transport d'énergie. Il implique des progrès sur le plan fondamental (physique des solides) et dans le domaine des matériaux et des procédés de fabrication (thermo-chimie des réactions, métallurgie des poudres, couches minces, etc.),

Les secteurs gros consommateurs et les grandes entreprises énergétiques ont les moyens de leurs recherches. Mais s'agissant des composants et

des techniques génériques (combustion, séparation, catalyse, matériaux, etc.), les recherches sont organisées de façon plus coopérative, avec les centres techniques professionnels, les équipementiers et l'ADEME (5) avec laquelle le PIRSEM coordonne ses interventions. Un moyen privilégié d'intervention est le soutien à la création de plates-formes d'essais (échangeurs thermiques, énergies radiantes, induction, perméation gazeuse). Dans ces domaines, l'action des laboratoires CNRS, agissant directement avec l'industrie ou sous l'incitation du PIRSEM ou du département SPI, porte sur les connaissances fondamentales en amont et sur les projets de moyen terme.

Ces dispositifs divers ont abouti à des résultats notables en certains domaines (échangeurs, chaudières à charbon, utilisation performante de l'électricité, membranes etc.), mais des retards par rapport à d'autres pays subsistent ; pompes à chaleur, régulateurs d'énergie, moteurs électriques, piles à combustibles, batteries avancées, etc.

### **Les usages dans l'habitat et le tertiaire**

Des progrès conséquents ont été effectués depuis quinze ans dans la compréhension de la thermique de l'habitat et dans la mise au point de systèmes de gestion d'énergie (régulation, télégestion) et de nouveaux matériaux isolants. Les programmes menés en France par le CSTB (6), l'ADEME et le PIRSEM y ont contribué. Divers groupements ont structuré les efforts : IRCOSE sur la régulation et la gestion des systèmes énergétiques et ALMETH pour la modélisation et la conception des bâtiments. Les entreprises (Saint-Gobain, GDF, etc.) ont aussi conduit elles-mêmes d'importants travaux de RD sur les matériaux isolants et les appareils de chauffage.

(5) ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ex-AFME : Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie).

(6) CSTB ; Centre Scientifique et Technique du Bâtiment-

Les recherches doivent être poursuivies dans quelques domaines : approche intégrée de la conception des bâtiments (maîtrise des consommations, confort, santé, etc.) par l'articulation de logiciels de conception thermique et logiciels de conception plus généraux, interface air-matériaux, mise au point de vitrages à transparence variable (pour le contrôle actif des échanges thermiques avec l'extérieur), mise au point d'isolants à haute performance sans CFC, étude de la convection naturelle de l'air dans les grands volumes, climatisation et technologie de traitement de l'air (thermique et dépollution), nouveaux types de pompes à chaleur.

## Les transports

Le domaine des **transports** est le noyau dur de la croissance tendancielle des consommations énergétiques. L'amélioration des performances des véhicules est plus que compensée par la croissance des besoins de mobilité et de transport de marchandises. Les recherches visent à la mise au point de moteurs à combustion incerne plus sobres en carburants et peu polluants, Elles portent sur la combustion turbulente, les transferts de chaleur aux parois, la cinétique chimique, la formation des polluants, le perfectionnement des pots catalytiques (moins de métaux précieux, travail à température élevée, régimes transitoires, combustion des suies dans les véhicules diesel).

L'objectif de réduction des impacts environnementaux (CO<sub>2</sub>, pollution urbaine) se traduit par diverses évolutions ; la reformulation des essences, l'usage de carburants oxygénés d'origine agricole (méthanol, éthanol, diester), le véhicule à hydrogène et le véhicule électrique. L'usage de l'hydrogène comme carburant constituerait une réponse idéale au problème de pollution urbaine, Mais des avancées notables dans le domaine du stockage par hydrures ou par vecteur chimique sont nécessaires. Il s'agit de trouver un matériau ni trop coûteux ni trop lourd, ni travaillant à pression trop élevée. Des hydrures de Fe-Mn-Ti pourraient avoir de telles propriétés. Les recherches devraient être relancées en

France sur les propriétés structurales, thermodynamiques et physiques de ces matériaux, notamment ceux à base de métaux hexagonaux. Quant aux **véhicules électriques urbains**, dont le développement fait l'objet de mesures d'incitations notables aux Etats-Unis depuis 1988, le problème principal reste celui de la maîtrise d'un mode de stockage électrochimique bien adapté à cet usage. Sur l'ensemble des techniques de propulsion en transports, les laboratoires CNRS interviennent dans le domaine des moteurs à combustion, des catalyseurs d'épuration, des hydrures et du stockage électrochimique.

## La réduction des pollutions

Les premières solutions ont porté sur la dépollution (désulfuration des fumées, dénitrification, dépoussiérage, traitement des effluents), puis sur l'abaissement des consommations unitaires. La recherche s'est focalisée ensuite sur de nouveaux procédés propres (lits fluidisés, chaudières à haut rendement, etc.). Enfin, actuellement, les techniques de dépollution fondées sur le transfert de pollution évoluent en intégrant des méthodes de séparation poussée, de destruction totale ou de régénération.

Certains développements technologiques, autonomes par rapport au seul critère énergétique, conduisent à des consommations supplémentaires d'énergie (épuration des gaz d'échappement). Toutefois il y a souvent proximité des domaines et convergence des critères, comme c'est le cas avec la catalyse hétérogène, la séparation membranaire, ou le génie des procédés. L'amélioration de l'efficacité énergétique et la minimisation des rejets CCO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, contaminants organiques et métaux) peuvent être obtenues par l'association de procédés à catalyseurs plus sélectifs et par le recyclage d'effluents. Mais on devra être attentif au retraitement des catalyseurs usagés (homogènes ou hétérogènes) pour éviter des mises en décharge.

Dans le futur, il pourrait être nécessaire d'engager des recherches sur les procédés d'extraction et de stockage du CO<sub>2</sub>, comme plusieurs gouver-



nements envisagent de le faire. Les schémas d'extraction de  $\text{CO}_2$  concernent : la combustion en petites installations en présence de chaux et stockage du  $\text{CO}_2$  sous forme de carbonate de calcium, l'absorption du  $\text{CO}_2$  et sa mise en dépôt sous forme solide par l'emploi de certaines argiles, le recours au solaire pour réduire le  $\text{CO}_2$  récupéré (photosynthèse activée opérant à partir d'algues ou de plancton, conversion du  $\text{CO}_2$  en cellulose, réduction photochimique de  $\text{CO}_2$  en composés organiques, étude et fonctionnement de la Rubisco (7)) ou encore réduction du  $\text{CO}_2$  en carbone graphite par une oxydation de  $\text{FeO}$  en  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Quant au stockage, il est prévu des injections au fond des mers ou dans d'anciens gisements d'hydrocarbures. La première étape devrait porter sur la faisabilité technique et l'évaluation économique et environnementale de ces procédés.

Pour conclure ce panorama relatif aux progrès des utilisations de l'énergie, on peut constater que la plupart concernent plusieurs disciplines.

En **combustion**, l'amélioration des connaissances porte sur les écoulements réactifs homogènes ou polyphasiques et leur modélisation, les transferts thermiques, la tenue des matériaux. La mise au point de méthodes d'élaboration de céramiques fragiles à base de nitrures, carbures et de revêtements de zircone fait appel aux connaissances des "solidistes". La turbulence, la cinétique chimique, les modèles d'écoulements polyphasiques (structures, interactions), etc. sont mobilisés. On notera au passage que ce type de modélisation est aussi nécessaire au transfert de fluides liquides en milieu poreux avec échanges (membrane) et à la récupération assistée de pétrole. En **séparation** d'espèces chimiques, la compréhension des phénomènes physiques et physico-chimiques concerne la physique des membranes et la chimie macromoléculaire. Les **logiciels de simulation ou de modélisation** et les systèmes experts qui se trouvent dans de nombreux domaines (moteurs, thermique

de l'habitat, etc.) synthétisent les connaissances nouvellement développées en thermique, en mécanique des fluides, en génie des procédés et en comportement plastique des matériaux.

Dans le domaine des **pompes à chaleur**, on étudie la thermodynamique, les transferts de chaleur et de masse et les mécanismes de fonctionnement qui concernent métallurgistes et chimistes du solide. Dans le domaine des **piles à combustibles**, sont étudiés les problèmes de matériaux (supports céramiques, propriétés électrocatalytiques) et leurs procédés d'élaboration (dépôt plasmas en particulier). Le domaine du **stockage électrochimique** concerne la physique et la chimie du solide pour l'élaboration de nouveaux matériaux d'électrodes, la physique des surfaces et l'électrochimie. Les **hydrures** réversibles concernent la physique et la chimie des solides. Il apparaît donc nécessaire de faciliter les coordinations interdisciplinaires.

## 4 - LES SOURCES D'ÉNERGIE ÉMERGENTES ET FUTURES

Les sources envisageables sont celles susceptibles d'offrir un approvisionnement énergétique abondant et renouvelable, sans émission de  $\text{CO}_2$ .

### L'électricité d'origine solaire

Deux voies sont explorées et développées, la voie thermodynamique et la voie photovoltaïque. La première, abandonnée en France (fin des études de Thémis), se poursuit en Allemagne et aux États-Unis (capteurs cylindro-paraboliques, héliostatats à membrane, stockage de courte durée). Quant à la seconde voie, elle occupe actuellement des créneaux où le service rendu en sites isolés justifie le coût de l'énergie produite (relais hertziens dans les pays industrialisés, éclairage et pompage dans les pays en développement). Mais, sur le long terme, on prévoit une baisse importante des coûts (60 à 75 F/kWh en 1992, 15 à 40 F/kWh en 2010), comparables alors à ceux d'une production centra-

(7) Rubisco : ribulose-biphosphate carboxylase (protéine la plus abondante de la biosphère).

Usée en de nombreuses régions, y compris aux Etats-Unis.

Dans le **domaine du solaire photovoltaïque**, le matériau de base est le silicium multicristallin et, dans 10 % des applications, le silicium amorphe-hydrogène. Divers développements technologiques dans les systèmes d'accompagnement (stockage, appareil à très faible consommation intégration du générateur au produit) ou relatifs à la conception de centrales photovoltaïques avec système de concentrateur de la lumière sur les modules de photopiles (comme aux Etats-Unis) faciliteraient la diffusion du photovoltaïque. Par ailleurs, sur le silicium multicristallin, le programme de RD a pour objectif de parvenir à un rendement de conversion de 14 % en production industrielle (11,5 % actuellement) et un rendement matière de 65 % (50 % actuellement) dans le procédé de fabrication. Ce rendement a été atteint par le CNRS, avec l'industriel Photowatt, en 1991, à l'aide de procédés en principe industrialisables. Des travaux (ARC "silicium cristallin" du PIRSEM) ont porté sur la passivation des défauts cristallographiques dans les procédés de fabrication par voie sèche, et des recherches se poursuivent sur la physique des joints de grain dans le Si, sur la mise au point des cellules "épitaxiales" minces et sur l'amélioration du matériau par hydrogénation.

Sur le silicium amorphe, seule filière industrielle de photopiles à couches minces, l'objectif est d'augmenter les rendements de conversion jusqu'à 10 % et d'abaisser les coûts par une production massive et des améliorations du processus de dépôt. Cette technique du silicium amorphe pourrait intéresser jusqu'à 30 % du marché international actuel (usage de faible puissance). Les recherches portent sur les causes non élucidées de la métastabilité du silicium amorphe en cherchant des remèdes. Elles portent également sur l'ingénierie des réacteurs de dépôt de couches minces photovoltaïques par décomposition de gaz porteur par plasmas. Des recherches sont menées par les laboratoires CNRS et d'universités dans le cadre des ARC "Métastabilité des matériaux amorphes" et "Modélisation des machines de dépôt".

D'autres semi-conducteurs prometteurs à long terme sont au stade des recherches amont dans les laboratoires sur actions propres PIRSEM. L'objectif consiste à prouver la faisabilité des rendements supérieurs à 30 % avec des matériaux composés III-V (de la famille des alliages GaAs) et de maintenir une veille sur les couches minces de diséleniure de cuivre indium (composé  $\text{CuInSe}_2$ ). Les performances de l'arséniure de gallium se dégradant moins à haute température, ce matériau pourrait être aussi le matériau retenu dans les centrales photovoltaïques à concentrateur.

Le bilan de la recherche-développement et de l'industrialisation des quinze dernières années est très positif. Ceci a été rendu possible par une recherche de base de niveau international et un bon couplage des laboratoires publics avec les laboratoires industriels. Le transfert vers l'industrie des filières arrivées à maturité a contribué à diminuer le volume des recherches CNRS, mais l'amélioration de ses filières et l'étude de nouveaux semi-conducteurs nécessitent le maintien d'une implication élevée des laboratoires.

## Les utilisations énergétiques de la biomasse

Les utilisations énergétiques de la biomasse pourraient se développer à grande échelle en se fondant sur des cultures sylvicoles, agricoles traditionnelles (céréales, oléagineux et betteraves), ou encore sur le développement de cultures énergétiques. Les carburants issus de la biomasse (alcools) demeurent coûteux, mais non sans avantages en terme d'indépendance et de protection de l'environnement. Les études en cours visent à augmenter de 20 à 30 % le rendement de la photosynthèse.

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique par photosynthèse fait l'objet de recherches de base très actives et nécessairement pluridisciplinaires : la physique (transfert d'énergie et transfert d'électron), la chimie (oxydo-réductions, catalyse de l'oxydation de l'eau par le manganèse

en phase lumineuse), la biochimie et la physiologie (transformation et stockage des produits carbonés et azotés en phase obscure). Plusieurs conditions de stress, souvent couplées entre elles, peuvent diminuer notablement les rendements de photosynthèse (contenu hydrique, températures extrêmes, illuminations fortes) : leur étude s'est fortement développée. Les efforts de recherche engagés pour aboutir à l'augmentation du rendement photosynthétique auront un impact planétaire et doivent être soutenus comme par le passé (CNRS, CEA, INRA, Universités).

Il faut, enfin, renforcer les recherches sur la fixation de l'azote atmosphérique pour diminuer à long terme les dépenses entraînées par l'épandage massif d'engrais azotés et les conséquences nuisibles de cet épandage sur l'environnement

En aval de la production de biomasse, les procédés de conversion en vecteurs énergétiques peuvent être améliorés (éthanol par fermentation des sucres, production d'esters à partir d'huiles végétales, production d'alcools ou de méthane à partir de cellulose par hydrolyse). Le remplacement de l'hydrolyse acide par l'hydrolyse enzymatique, plus efficace et sans rejets toxiques, a permis d'importants progrès pour la production d'éthanol par la cellulose. Mais l'amélioration des procédés passe par une meilleure connaissance de ceux-ci, par la sélection de souches spécialement adaptées aux productions recherchées, par la progression de la voie enzymatique et des techniques de séparation par membranes. Des recherches importantes sont donc nécessaires, en particulier en microbiologie appliquée, en biotechnologies, en catalyse (pour la transformation de la lignocellulose) et, plus généralement, en génie des procédés de transformation de la matière dans les agro-industries. Les recherches en France ont été actives d'une part sur la filière méthanol ex-bois avec le pilote de Clamecy et, d'autre part, sur l'hydrolyse enzymatique de la cellulose dont les études se sont appuyées sur la plate-forme de Souston. Mais elles sont ralenties actuellement par le peu d'intérêt de l'industrie, ce qui réduit l'implication des laboratoires CNRS.

La valorisation énergétique des **déchets urbains**, soit par combustion, soit par fermentation anaérobie, nécessite également des recherches sur les procédés en cours de développement. L'optimisation de la méthanisation concerne l'amélioration de l'hydrolyse (étape importante de la fermentation), la sélection de bactéries cellulolytiques capables de dégrader efficacement les déchets cellulosiques et le contrôle des inhibiteurs de la méthanisation.

## La fusion thermonucléaire

Beaucoup d'espoirs ont été placés dans la fusion thermonucléaire, du fait de son caractère quasi inépuisable (deutérium de l'eau de mer), de l'absence de pollution atmosphérique et de risque d'emballement du réacteur, et de la réduction du problème des déchets radioactifs par rapport à la fission. Dans un plasma chaud (150 millions de degrés environ), la réaction de fusion entre des noyaux de deutérium et de tritium fournit une énergie avec 70 % en émission de neutrons et 30 % de particules  $\alpha$ . Deux voies sont à l'étude :

- le confinement magnétique, où le plasma est isolé des parois du réacteur par un champ magnétique;
- le confinement inertiel par laser ou ions lourds, qui repose sur le principe de la réalisation de micro-explosions thermonucléaires à haute cadence.

Concernant la première, les progrès sur la physique des plasmas, le chauffage et le confinement ont permis de faire des avancées considérables, C'est au JET (*Joint European Torus*), grand équipement expérimental associant les pays de la CEE, qu'ont été produits en novembre 1991 les premiers mégawatts de puissance pendant deux secondes. Le critère d'auto-entretien de Lawson est désormais à portée de main, avec la prochaine machine qui devra atteindre un niveau d'énergie cinq fois plus important pour y parvenir. Mais si la maîtrise scientifique de la fusion magnétique est considérée comme près d'être acquise, la maîtrise technologique basée sur les concepts actuels soulève



des problèmes très importants : tenue des matériaux et des structures soumises à une forte irradiation neutronique qui les fragilise, manipulation particulièrement délicate du tritium fortement radioactif, réalisation de champs magnétiques élevés par des supra-conducteurs dans des volumes de plusieurs dizaines de m<sup>3</sup>, conception et tenue de la première paroi qui contient la couverture fertile de lithium. Un réacteur industriel n'est envisagé qu'au milieu du prochain siècle, les réacteurs de démonstration n'étant pas prévus avant 2010-2030,

La France est en bonne position avec le programme du CEA et sa machine Tore-Supra à bobine supra-conductrice, ainsi que par sa participation, au JET. Diverses équipes CNRS (environ 30 chercheurs), fédérées dans le GDR Fusion Magnétique, apportent un soutien théorique et expérimental apprécié. Ces efforts doivent être maintenus.

Le **confinement inertiel**, dont l'étude à des fins civiles est plus récente, a été principalement étudié après la déclassification militaire de 1972 aux Etats-Unis. Il consiste à Faire imploser une capsule de dimensions millimétriques, contenant un mélange deutérium-tritium en l'irradiant symétriquement par des faisceaux laser ou d'ions lourds (attaque directe) ou en produisant un champ intense de rayons X produit au sein d'une cavité où est placée la capsule (attaque indirecte).

Sauf au Japon, le financement des recherches est principalement d'origine militaire, et la CEE n'y consacre qu'environ un pour cent de son budget sur la fusion. Les travaux expérimentaux sur l'implosion sont effectués essentiellement avec des lasers. Mais la création et le transport de faisceaux d'ions intenses en vue de la fusion sont l'objet d'un effort important, principalement aux Etats-Unis, au Japon et en Allemagne. Des densités de plusieurs centaines de fois supérieures à celle de l'état liquide ont été obtenues aux Etats-Unis et au Japon. On estime que le gain élevé nécessaire dans une réaction sera obtenu au moyen de sources laser dont le niveau d'énergie est de quelques mégajoules. Mais les installations de taille moyenne contribuent aussi largement à l'avancement du sujet et la démonstra-

tion de points clefs : mode de dépôt d'énergie, transport thermique et processus d'ablation, génération de chocs et stabilité hydrodynamique. Cependant des problèmes importants restent à résoudre sur la physique du dépôt, et sur la symétrie des implosions à convergence élevée, qui est nécessaire aux cibles à haut gain. L'effort est mis sur les méthodes d'uniformisation de la pression d'ablation, la stabilité hydrodynamique, le mélange entre le milieu dense et la zone centrale chaude.

Les objectifs à moyen terme sont la mise en œuvre d'un laser de 1 à 2 mégajoules. La mise en chantier d'un réacteur de démonstration et l'étude des problèmes d'ingénierie sont prévues pour les années 2010-2020.

Les recherches françaises sont très actives. Le CEA dispose avec Phébus (20 kj) du troisième laser mondial, et a obtenu récemment près de cent fois la densité du liquide. Dans le domaine laser où le CNRS est très présent, les équipes ont obtenu des résultats importants qui ont eu un impact sur les programmes internationaux. Elles ont démontré l'effet des courtes longueurs d'onde, le transport délocalisé, et obtenu des résultats marquants sur la physique atomique, la thermodynamique des plasmas denses et chauds, et la génération de pressions supérieures à 100 mégabars.

Dans le domaine de la fusion par ions lourds, où les travaux au CNRS sont coordonnés par le GDR "ions lourds-plasmas denses", des résultats ont été acquis avec un laboratoire allemand sur la physique de dépôts par ions lourds. Ils concernent<sup>1</sup> le pouvoir d'arrêt dans les plasmas chauds et les états de charge des ions lourds au cours du processus de ralentissement. A court terme, de nouveaux modes de dépôt d'énergie dans la matière par impact de charges corrélées (molécules ionisées, agrégats métalliques) seront explorés. Cet impact simule des densités d'énergie comparables à celles de faisceaux intenses de particules atomiques. À long terme, les recherches porteront sur l'efficacité de conversion X, l'accélération des agrégats et la physique d'interactions ions-plasmas, avec l'utilisation des grandes installations européennes.

## Les autres sources du futur

On n'en évoquera que deux autres : la géothermie profonde en roches sèches ou magmatiques, et les satellites solaires. La première consiste à créer, à une profondeur compatible avec la température souhaitable, un échangeur thermique par facturation des roches profondes du socle terrestre (par liquide sous forte pression) entre deux forages alimentés artificiellement en eau. Les difficultés à résoudre résident dans la mise au point des techniques pour la prospection et la confirmation des réservoirs et dans la capacité de réalisation d'échangeurs thermiques artificiels de bonne qualité sous les contraintes que Ton imagine,

Il y a quelques programmes de ce type dans le monde (Etats-Unis notamment) dans des zones à fort gradient de température, dont celui du projet européen de Soultz-sous-Forêt en Alsace. Le CNRS, associé au BRGM et à l'ADEME dans le groupement "Géoproge", y participe activement. Les recherches portent sur l'influence de la facturation naturelle sur la création d'un échangeur, sur les méthodes pour caractériser les facturations selon les conditions géologiques, sur le comportement hydrodynamique des fractures naturelles affectant les massifs rocheux.

La voie des satellites solaires consiste à utiliser de grandes surfaces de panneaux photovoltaïques à très haut rendement (AsGa, etc.) et à transmettre l'énergie produite par faisceaux hyperfréquences, ou micro-ondes à la surface de la terre. Dans l'espace, l'ensoleillement annuel est quatre à cinq fois plus important que sur terre. Les obstacles seraient le coût des lancements spatiaux nécessaires et la pollution stratosphérique associée, ainsi que les risques environnementaux associés à la réception des faisceaux hyperfréquences. Cette voie technique ne fait guère l'objet de recherches, alors qu'elle pourrait être aussi prometteuse que la fusion thermonucléaire. Elle justifie de maintenir l'effort sur les semi-conducteurs à haut rendement et de développer des études sur les méthodes de transmission de l'énergie depuis l'espace.

## 5 - SOCIO-ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE

Un certain nombre de recherches analytiques et de développements méthodologiques antérieurs arrivent à maturité. C'est le cas de la modélisation technico-économique de l'offre et de la demande d'énergie en longue période, fondée sur une représentation explicite des filières de production, de conversion ou d'utilisation d'énergie et des comportements sociologiques et décisionnels plutôt que sur l'économetrie, représentation qui avait permis de briser les idées reçues sur la rigidité du lien énergie-croissance. C'est le cas également des modèles d'interprétation du fonctionnement des marchés pétroliers, qui butent sur la difficulté logique d'intégrer la réalité politique dans la représentation économique.

Après 1985, les recherches ont porté aussi sur les structures des industries de réseaux énergétiques et leur réglementation, sous l'effet de la critique néo-libérale des monopoles de service public. Celle-ci propose de privilégier le marché par rapport à la réglementation pour inciter à l'efficacité économique. Les changements institutionnels qui ont résulté de ces débats en Europe et aux Etats-Unis pèsent sur les évolutions techniques, en favorisant, via la concurrence, une certaine décentralisation des systèmes, notamment en production électrique.

Les recherches méthodologiques et analytiques nouvellement menées en France et en Europe sont en grande partie déterminées par la nécessité de lier à présent enjeux énergétiques et enjeux environnementaux dans la définition des politiques. Trois thèmes sont bien identifiables dans ce domaine :

- La **prospective menée à l'aide de modèles mondiaux**, qui cherche à repérer en longue période comment peuvent jouer les limites imposées à la croissance économique par les ressources énergétiques épuisables ou par les politiques de prévention de l'effet de serre. Il s'agit également d'apprécier si la technologie peut lever la contrainte des ressources épuisables, et, plus fondamenta-

lement, il s'agit de baliser les sentiers énergétiques qui pourraient déboucher sur un développement durable. Une place particulière est faite, dans ces approches, à la situation des pays en développement, en raison des contraintes de financement et des obstacles environnementaux auxquels ils se heurteront.

- Les recherches méthodologiques importantes effectuées depuis 1985 sur **les critères de choix technologiques et énergétiques sur le long terme**. Elles concernent l'appréhension des coûts cachés, des externalités et du risque associés aux différentes techniques ou filières énergétiques. Certaines ont porté sur la valorisation de l'avantage de la flexibilité (équipements polyénergie). D'autres concernent les décisions de très long terme sous incertitude (arbitrages intergénérationnels). D'autres, enfin, ont porté sur l'efficacité des instruments économiques et institutionnels permettant d'internaliser à moindre coût les risques environnementaux (normes, taxes, droits à polluer). Toutes devraient être affinées pour être plus largement applicables aux choix de maîtrise de l'énergie ou de développement de modes de production d'énergie décentralisée ou renouvelable, en mettant l'accent sur les relations économiques entre les systèmes énergétiques décentralisés et les grands réseaux centralisés,

- Les analyses **d'économie et de sociologie du changement technique**. Les politiques des Etats ou le jeu brut des forces du marché ne suffisent pas à l'appréhension des mécanismes sous-jacents de révolution des systèmes énergétiques. Des recherches historiques de longue période ont été démarrées; elles connaissent un prolongement naturel dans l'analyse de l'influence grandissante des critères d'environnement sur l'évolution des techniques dans les systèmes industriels ou les systèmes de transports. Parallèlement, l'approche sociologique et institutionnelle en termes de réseaux d'acteurs montre comment le devenir d'un système technique dépend de son histoire institutionnelle et sociale et non pas seulement de sa promesse d'évolution vers un état caractérisé par une plus grande efficacité économique (et "sociale") : à titre

d'exemple, il suffit de se référer aux effets d'exclusion exercés par les systèmes énergétiques centralisés. Une telle approche permet également d'identifier les mécanismes sociaux sous-jacents aux difficultés de diffusion d'une innovation dans le domaine de l'énergie.

En procédant à des études sectorielles fines, clans le domaine de la maîtrise de l'énergie (pompes à chaleur, cogénération...), on pourrait mettre à jour les modes d'insertion et les conditions de succès d'innovations dans les stratégies d'acteurs et dans leur environnement social (problème de l'acceptation sociale), et aider au développement d'une "ingénierie sociale" des changements de comportements nécessaire à la pénétration des nouvelles techniques. Une autre approche consisterait à repérer les effets d'apprentissage et les mécanismes de rétroaction positive qui concourent à la diffusion d'une technique après son amorçage. Elargies, ces recherches seraient utiles à l'analyse du transfert de technologie et à l'insertion des énergies nouvelles et renouvelables dans les pays en développement

L'analyse du domaine des transports met en jeu des disciplines qu'il faut mobiliser sur ce sujet plus que cela ne l'a été jusqu'à présent : économie, organisation, urbanisme et aménagement, sociologie. Le problème est à analyser dans deux cadres assez différents : les transports interurbains d'un côté et les transports dans les villes de l'autre. Il est souhaitable que le PIR Ville traite de ces questions. L'organisation des transports, les réseaux, les concepts de transports multimodaux, la planification des infrastructures constituent également un champ économique et social majeur dont les aspects énergétiques, généralement considérés comme secondaires, imposent cependant des contraintes dans la stratégie de maîtrise des consommations d'énergie.

En dehors des entreprises, les recherches socio-économiques sur l'énergie ne mobilisent pas en France plus d'une vingtaine de chercheurs en économie, en sociologie et en histoire, ce qui est peu. Cette communauté, qui est aussi active que



celles de pays comparables, mériterait cependant d'être soutenue par un renforcement de ses effectifs en liaison avec le développement des thèmes précédents.

## PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS

### 1 - PROPOSITIONS PARTICULIÈRES

Du panorama précédent, il ressort un certain nombre de domaines transversaux de recherche fondamentale ou finalisée sur lequel l'effort mériterait d'être accentué.

- La maîtrise des **plasmas froids** permet la production industrielle de matériaux présement des propriétés très spécifiques (dépôts de matériaux supportant des hautes températures, matériau actif pour la conversion photovoltaïque, ...)- L'étude de ces plasmas réactifs doit être poursuivie en associant les équipes possédant les diverses compétences requises.

- Le **génie des procédés** doit concourir au progrès des techniques industrielles en intégrant les critères énergétiques et environnementaux à l'étape de la conception. Il conviendrait de soutenir le perfectionnement de logiciels de simulation, d'optimisation, de CAO, avec intégration des potentialités de pollution et utilisation d'algorithmes multicritères. Ces derniers intéresseraient d'autres domaines comme la combustion, la thermique de l'habitat, etc.

- Les recherches en **combustion** méritent un renforcement notable de la communauté scientifique, trop réduite en ce domaine, notamment sur les questions de moteurs et de turbomachines. L'amélioration des connaissances en cinétique chi-

mique contribuerait à la limitation des émissions de polluants. Des domaines comme l'électrocombustion, la combustion catalytique et la post-combustion des suies devraient être plus attentivement étudiés,

- La mise au point de **catalyseurs** plus sélectifs nécessite un effort soutenu à la fois en synthèse et en caractérisation de nouveaux matériaux catalytiques, et un effort nouveau pour approfondir les mécanismes des réactions catalytiques et leur cinétique de façon à optimiser les rendements des réactions.

- Les recherches sur le **stockage de l'énergie** doivent être promues plus clairement, notamment pour faciliter le développement de véhicules moins polluants (véhicules électriques, véhicules à hydrogène) ou celui de sources d'énergie aux apports intermittents. Outre le stockage d'hydrogène par les hydrures, les recherches sur le stockage électrochimique devraient être renforcées et diversifiées pour faire place à des approches plus globales sur le système d'ensemble.

En dehors de ces domaines transversaux, des recommandations particulières autres que celles déjà énoncées méritent d'être formulées.

- Certaines techniques de production et d'utilisation de l'électricité sont relativement délaissées en France, faute de s'inscrire dans la stratégie de l'entreprise électrique publique. La mise au point de piles à combustibles pouvant constituer un enjeu commercial important, elle mériterait un effort incitatif accru vis-à-vis des industriels, des laboratoires du CNRS et des universités. S'agissant des usages captifs de l'électricité, il y aurait lieu d'encourager plus nettement le développement de techniques plus économes : lampes fluo-compad.es, lavage par ultra-sons, production de frigories, etc.

- L'effort doit être maintenu dans le domaine du solaire photovoltaïque en raison de l'importance des efforts étrangers (Allemagne, Etats-Unis, Japon) justifiée par les enjeux environnementaux et commerciaux, notamment vis-à-vis des pays en dé-

veloppement. En recherche fondamentale il s'agit d'approfondir les problèmes de physique des interfaces (microcristallisation de matériaux semi-conducteurs sur les hétérosurfaces, passivation des états recombinants) qui influent radicalement sur le rendement. En recherche finalisée, il s'agit de mettre au point de nouveaux procédés d'élaboration de photopiles en couches minces qui sont la clé du développement à large échelle du photovoltaïque, car eux seuls permettent d'éviter le risque de pénurie du matériau de base. Divers procédés, (plasma, électrochimie, etc.) et plusieurs matériaux (silicium polycristallin ou amorphe, composés II-VI tels que le  $\text{CuInSe}_2$  ou le  $\text{CdTe}$ ) restent en concurrence, Il s'agit également de mettre l'accent sur la conception d'ensemble de systèmes articulant les fonctions de production, de stockage et de régulation,

- Dans le domaine de la fusion, l'importance de l'enjeu justifie le maintien de l'effort, en sachant que les recherches actuelles ont des prolongements positifs dans d'autres domaines. Mais les orientations à prendre doivent être soigneusement évaluées. Les laboratoires CNRS et d'universités doivent continuer à tenir leur place au plan national et international en coopération avec les centres de recherche du CEA. Ces équipes doivent être soutenues afin de pouvoir accéder aux grandes installations étrangères. En fusion magnétique et en fusion laser, il semble important que le CNRS précise clairement sa politique et discute de la place de ses équipes avec le CEA. Par ailleurs la création au niveau du CNRS d'une structure coordonnée qui associerait tous les thèmes s'appuyant sur l'interaction laser-matière à haute intensité, dont ceux concernant la fusion, constituerait un moyen efficace de développement de recherches pluridisciplinaires.

- Le potentiel de recherches socio-économiques sur l'énergie en France doit bénéficier d'un renforcement au cours des prochaines années, notamment pour permettre le déploiement des recherches sur la thématique Energie, Environnement et mode de Développement Des coopérations doivent eue établies encre économistes, sociologues, climatologues et spécialistes des problèmes de pol-

lution, voire avec d'autres secteurs (industrie, transport, agriculture). La création du GDR "Développement économique, mutations techniques et environnement global"<sup>11</sup> sera une première réponse à cette nécessité.

» L'évaluation technologique dans le domaine énergétique est un domaine trop peu développé en France. Des procédures systématiques d'évaluation *ex ante* des choix technologiques et des innovations devraient être développées en intégrant les impacts éventuels sur l'homme et sur l'environnement (par exemple, pour la fusion, évaluer les contraintes de disponibilité des matières, les bilans radioactifs, les problèmes de transport et de stockage de critium, etc.). Il n'est pas sain que les évaluations soient le fait de leurs seuls promoteurs, pour d'évidentes raisons. Le CNRS doit, donc jouer un rôle plus actif en ce domaine, en soutenant l'affirmation et l'expression de capacités d'expertise par ses laboratoires dans le domaine technique et socio-économique.

## 2 - PROPOSITIONS GÉNÉRALES

Les possibilité d'intervention de la recherche publique dans le domaine de la production et des usages de l'énergie sont très diverses dans leur nature disciplinaire et dans leur Finalité (recherche fondamentale, recherche finalisée, développement et démonstration). Les actions publiques sont structurées par la présence de grands organismes publics (ou mixtes) à vocation technologique (CEA, IFP, INRA, etc.) et d'agences d'objectifs (ADEME) et délimitées par les actions propres des grandes entreprises énergétiques. Le CNRS a d'abord pour vocation d'intervenir en recherche fondamentale en amont des processus d'innovation. De ce fait, tout en se préoccupant de la demande aval des grands acteurs du secteur énergétique, il doit prendre en considération un éventail plus ouvert de pistes de recherche. Il doit intervenir aussi en recherche finalisée dans les champs scientifiques et technologiques laissés vacants par les autres organismes, ou à la demande des grands acteurs, notamment parce

que le développement technologique et l'apprentissage en cours de diffusion nécessite fréquemment un retour à la recherche. Dialogue et partenariat doivent caractériser les recherches finalisées.

## Un pilotage par l'aval à dépasser

Dans cette configuration, la recherche publique doit savoir dépasser le seul pilotage par l'aval. Les départements de recherche des entreprises énergétiques représentent un potentiel considérable. Mais leur action de recherche est très ciblée sur des objectifs commerciaux. La recherche publique doit y apporter son concours, mais se doit de prendre aussi en compte des objectifs qui ne relèvent, pas des seules préoccupations des entreprises.

Les recherches finalisées doivent répondre à une demande identifiée ou latente : identifiée si la demande provient des industriels; latente, mais réelle si les enjeux d'application ont une importance majeure, soit à un terme qui dépasse leur horizon, soit dans des domaines dont ils sont absents ou dont les enjeux les dépassent (coopération avec les pays en développement). En effet les évolutions du système énergétique français sont assez spécifiques et conduisent à des effets d'exclusion sur des techniques largement développées ailleurs. L'option nucléaire par exemple a eu des effets d'éviction sur les techniques à charbon propres, les cycles combinés gaz/vapeur, les piles à combustibles, le solaire photovoltaïque. Dans ces conditions, le seul pilotage par l'aval risquerait de placer l'économie française dans une situation dangereuse d'isolement. De la même façon, la recherche publique, et notamment l'action du CNRS, doit renforcer l'action innovante dans des domaines éclatés ou neufs (maîtrise de l'énergie, solaire, géothermie profonde) là où n'existent pas de réseaux d'acteurs puissamment structurés, ou dans les domaines délaissés par les entreprises énergétiques.

Cette prise de distance vis-à-vis d'un pur pilotage par l'aval n'est pas antinomique de la pré-

occupation constante de rencontrer un intérêt en aval. Cela signifie qu'il faut protéger de la conjoncture certains projets, et cependant savoir les limiter dans le temps : lorsque le stade de démonstration est atteint, il faut veiller à ce que les connaissances et les savoir-faire acquis soient transmis à l'industrie. Ultérieurement, si des problèmes apparaissent pendant l'apprentissage et l'industrialisation d'un nouveau procédé ou produit, les laboratoires peuvent être de nouveau sollicités pour intervenir en amont. Au cas où les entreprises ne sont pas intéressées, il faut savoir arrêter, au risque de voir les industriels manifester ultérieurement un regain d'intérêt (cf. par exemple la mise en sommeil de l'effort sur les centrales solaires thermodynamiques, l'hydroliquéfaction etc.).

Une bonne façon de conduire des recherches finalisées est d'organiser une concertation avec les industriels sur l'enjeu potentiel des techniques qui auraient des chances d'émerger dans le futur. Telle est la vocation du Club d'Ingénieur-Pro prospective (CLIP) dans le domaine de l'énergie, qui est en cours de création et qui regroupe les partenaires industriels, les organismes de recherche, les centres techniques professionnels et les agences publiques.

À l'avenir, le jeu pourrait être plus ouvert, compte tenu du rôle croissant de la Communauté Européenne dans le domaine de la recherche-développement. L'encouragement au partenariat international par les divers programmes européens en RD énergétique (JOULE, etc.) constitue une bonne opportunité d'ouverture vers d'autres laboratoires ou entreprises de la Communauté, notamment lorsque qu'il y a conjonction d'intérêts avec des entreprises françaises. Le CNRS et le MRE devraient en conséquence définir une politique scientifique dont les articulations avec celle de la Communauté Européenne apparaissent clairement. Par ailleurs, les responsabilités de la France dans le domaine de la coopération avec le tiers monde devraient se traduire par une politique active de recherches finalisées en coopération, qui sont encore peu développées aujourd'hui.



## Le rôle du nouveau PRISTE dans le domaine énergétique

Le regroupement récent du PIRSEM et du PIREN (8) au sein du nouveau Programme de Recherche Interdisciplinaire sur la Science, la Technologie et l'Environnement (PRISTE), concrétise la convergence croissante des critères énergétiques et environnementaux dans l'orientation de la recherche-développement. Ce regroupement devrait renforcer les synergies et faciliter la coordination des actions du CNRS avec celles du Service de la recherche du Ministère de l'environnement (SRETIE) et, bien sur, de l'ADEME qui a déjà une longue tradition de soutien dans le domaine des énergies renouvelables et des économies d'énergie.

Mais le sous-programme Technologie Energie Environnement (TEE), émanation de l'ex-PIRSEM, doit conserver une certaine autonomie en matière énergétique, dans la mesure où tout ne peut être subordonné au seul critère environnemental. A l'évidence, ce sous-programme a acquis une expérience efficace d'incitations à la recherche finalisée par l'articulation des activités des laboratoires CNRS

et des laboratoires industriels. Il agit comme une agence d'objectifs, en accord avec les départements scientifiques concernés, pour piloter des recherches en relation avec les entreprises. Il sait déceler les demandes des divers secteurs économiques et les traduire en thématiques de recherche; il procède aussi à sa propre prospective technologique au plan français et international, il mobilise les laboratoires aux compétences complémentaires en organisant les rapprochements disciplinaires pertinents et en mettant les laboratoires en relation avec les industriels dans le cadre des actions de recherche coordonnées. Les recherches sur le photovoltaïque définies en relation avec l'ADEME et les industriels constituent un exemple réussi de cette pratique,

Il conviendrait donc, à l'avenir, de maintenir ce savoir-faire existant dans le domaine des techniques énergétiques, en élargissant le champ d'intervention à des actions relevant conjointement des critères énergétiques et environnementaux.

**Dominique Finon**  
*Président du groupe 13*

(8) PIREN : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement du CNRS.

# 14

## LA TERRE : DYNAMIQUE ET CHANGEMENT GLOBAL

### AVANT-PROPOS

Malgré d'immenses progrès en observations, en modélisation et en analyse, la compréhension de la dynamique de notre planète et des interactions terre-océan-atmosphère-biosphère reste encore insuffisante au regard de la complexité des problèmes rencontrés. Des changements globaux peuvent intervenir sur des échelles temporelles très variées. Les corps célestes imposent leur rythme lent, la convection du manteau entraîne la dérive des continents à l'échelle des temps géologiques, alors que celle du noyau entretient un champ magnétique planétaire variant légèrement à l'échelle du siècle et basculant complètement au rythme de quelques centaines de milliers d'années, la composition chimique de l'océan et de l'atmosphère évolue sous les flux géothermiques et les modifications de la biosphère, les calottes glaciaires fondent et s'érigent en milliers d'années, la végétation se modifie sur une dizaine d'années, l'océan stabilise l'évolution des conditions atmosphériques sur le millier d'années, mais il peut aussi décupler la réponse de l'atmosphère en provoquant des phénomènes rapides comme El Nino ou les cyclones. Les degrés de liberté du système terrestre sont multiples. Pourtant l'homme y vit depuis quelques millions d'années. Des mutations climatiques impor-

tantes ont déjà eu lieu. Mais quelles sont les amplitudes des changements que peut supporter l'homme et à quelle vitesse peut-il s'adapter?

Les limites de notre connaissance sont d'autant plus évidentes que les activités humaines ont atteint une ampleur telle qu'elles perturbent la dynamique des enveloppes fluides. C'est donc dans l'urgence que les scientifiques doivent apprécier révolution du système. Cette prédiction est compliquée par des facteurs tout à la fois humains, physiques et historiques :

- l'accroissement des activités humaines est quasi-exponentiel et dominé par des facteurs socio-économiques, culturels et politiques;

- les réponses du système peuvent être hautement non-linéaires et donc difficilement prévisibles;

- enfin les modifications passées de l'équilibre dynamique de notre planète (changements des propriétés de l'atmosphère, de la température, du niveau des mers, extinction en masse d'espèces vivantes, dégazage dû à l'activité géothermale, effets sur la biosphère des inversions du champ magnétique..) sont insuffisamment comprises.

Le système terre-océan-atmosphère-biosphère est complexe, mais l'homme d'aujourd'hui a les

moyens de relever les défis. Les possibilités technologiques ont fait d'énormes progrès. Les satellites sondent l'atmosphère et traquent les composants chimiques, les réseaux sismologiques se densifient, les calottes polaires sont surveillées, les fonds marins explorés et cartographiés... La puissance des calculateurs permet d'améliorer constamment la précision de nos modèles et le nombre de données traitées. La réflexion scientifique a beaucoup progressé et de nouveaux outils conceptuels ont émergé pour répondre aux questions posées : comportement chaotique des systèmes dynamiques, dynamique non-linéaire... La compréhension des processus a fortement augmenté : les modèles atmosphériques tiennent compte des nuages, les tourbillons entrent dans les océans, les végétations se différencient la biologie se met en équations.

## ENJEUX

### 1 - LA TERRE SOLIDE

La structure interne de notre planète fait désormais l'objet d'études globales, bénéficiant ainsi des immenses possibilités offertes par les moyens spatiaux, mais aussi pour les nombreux réseaux spécialisés (tomographie sismique, champs gravitaire et magnétique, déformation et déplacements...). Ces énormes moyens fournissent maintenant une image de plus en plus précise des structures et permettent d'aborder directement la cause physique des phénomènes régissant notre monde.

L'origine et l'évolution de la Terre - modalités de l'accrétion initiale et de l'individualisation des divers niveaux - en relation avec les autres objets planétaires, restent des questions d'actualité qui devraient bénéficier des résultats attendus en planétologie. Ainsi, le fait que la Terre soit la seule planète du système solaire à posséder une tecto-

nique de plaques n'a pas trouvé d'explication totalement convaincante.

La dynamique du noyau, dont la partie externe fluide est à l'origine du champ magnétique terrestre, constitue un problème fascinant pour les théoriciens, mais aussi un enjeu majeur pour comprendre la dynamique de l'ensemble de la planète. En effet, les variations du champ magnétique (inversions, variations d'intensité) sont, semble-t-il, associées à des bouleversements importants à la surface de la Terre qui peuvent affecter la biosphère.

La dynamique du manteau nous est plus proche puisqu'elle est responsable de la tectonique de surface. L'énergie provient essentiellement de la radioactivité des roches. Grâce aux progrès de la physique des hautes températures et aux capacités des ordinateurs, on peut maintenant proposer des modèles tridimensionnels de convection assez réalistes. Il reste encore à comparer les résultats de *ces* modèles aux observations. Ceci nécessite une bonne description des hétérogénéités mantelliques, grâce à la tomographie sismique, et de leur évolution dans le temps, grâce à la géochimie. Un échantillonnage du manteau à l'échelle globale nous est fourni par l'étude des dorsales qui constituent de véritables fenêtres ouvertes sur l'intérieur de la Terre.

Depuis vingt ans, la géophysique interne et la géologie s'appuient sur le concept de tectonique des plaques et l'illustrent. Pourtant il est clair qu'un nouveau saut qualitatif doit être effectué dans notre connaissance de la Terre. Les mesures de positionnement montrent les limites du concept de plaques rigides lorsque des déformations en bordure de plaques sont mises en évidence, le couplage entre la convection mantellique et la tectonique de surface, ainsi que la stabilité temporelle de structures très localisée comme celles associées aux volcans intra-plaques (par exemple Hawaï), ne sont toujours pas compris.

La dynamique de la Terre solide est couplée de façon étroite, mais très complexe, à celle de ses enveloppes fluides. La surrection des reliefs, par



exemple le Tibet, s'accompagne d'une modification de la circulation atmosphérique. Les mouvements horizontaux des plaques entraînent une modification des courants marins par modifications des isthmes, et le niveau marin lui-même dépend principalement de l'activité géodynamique (plus élevé lorsque les dorsales médio-océaniques sont plus rapides). De plus le volcanisme et l'érosion des reliefs jeunes modifient très sensiblement le bilan chimique de l'atmosphère et de l'hydrosphère, ce qui affecte les cycles bio-géochimiques. Si les modifications climatiques globales, telles que les périodes de glaciation, sont induites par des forçages orbitaux, elles sont aussi affectées par des processus géodynamiques à des échelles de temps plus longues. La nature de ces contrôles est encore mal comprise, mais la géologie contient sans aucun doute d'autres informations que Ton saura décrypter.

Certains enjeux de la géophysique interne sont étroitement liés à des recherches de physique fondamentale. Les mécanismes d'excitation de la dynamo nucléaire étaient, pour Einstein, l'un des problèmes majeurs de la physique. Les concepts de turbulence, de chaos, détracteurs sont au cœur de la convection des différentes enveloppes planétaires. Les mécanismes de rupture font intervenir les notions de self-affinités ou de fractals. Si les Sciences de la Terre ont bénéficié des apports de la physique fondamentale, en retour la géophysique offre un champ d'observation très vaste des phénomènes complexes liés à la mécanique non-linéaire des grands systèmes.

Les enjeux économiques de la géophysique interne sont énormes. La compréhension de notre planète nous permet la détection et l'utilisation des minéraux et des combustibles fossiles. Les problèmes du stockage de matériaux dangereux, chimiques ou radioactifs, se posent de jour en jour avec plus d'acuité, car la quantité de ces déchets et leur durée de vie augmentent.

L'étude et la prédiction des risques naturels, tels que tremblements de terre et éruptions, constituent un enjeu très important du point de vue hu-

main et économique. Ces risques s'accroissent avec la densification des concentrations humaines. Des domaines tels que la prévision sismique, à cause de la difficulté du problème et du fait que les observations n'ont été effectuées que depuis quelques dizaine d'années, sont à peu près dépourvus de méthodes de prévision à court terme. Le développement de tels outils serait un progrès majeur. Même en se plaçant du point de vue strictement économique, le financement consacré à la recherche dans ces domaines, au niveau mondial, est très largement inférieur aux pertes provoquées par une catastrophe majeure.

De nombreux enjeux scientifiques constituent aussi des enjeux technologiques. Une bien meilleure connaissance sismologique de l'intérieur de la planète proviendrait de l'installation de stations sismologiques en fond de mer, ce qui permettrait une densification et une homogénéisation des réseaux existant. L'exploration du fond de mer et des dorsales demande des systèmes sous-marins habités ou automatiques pour les prélèvement d'eau, de gaz et de roches. Les mesures du champ de gravité et du champ magnétique par un satellite passe par la conception de nouveaux magnétomètres et accéléromètres.

## 2 - OCÉAN-GLACE-ATMOSPHERE

La source d'énergie animant la dynamique du système océan-glace-atmosphère provient du soleil. Le rayonnement reçu par la Terre n'est pas réparti spatialement et temporellement de façon homogène, et cette répartition inhomogène d'énergie thermique, combinée à la rotation terrestre, détermine les grands mouvements du système océan-atmosphère. Une des causes identifiées des variations climatiques provient des mouvements astronomiques. Cependant, nous n'avons qu'une connaissance fragmentaire des mécanismes reliant ces variations astronomiques à l'évolution du climat. La Terre ne subit pas sans réagir ces variations climatiques qui déclenchent des contre-réactions dont la nature et l'amplitude sont mal cernées. L'atmo-

sphère réagit très rapidement aux variations d'ensoleillement, mais l'océan réagit mille fois plus lentement aux variations des échanges d'énergie avec l'atmosphère. De plus, la cryosphère intervient avec sa dynamique propre. Les calottes glaciaires évoluent très lentement, alors que la glace de mer est un indicateur des modifications rapides du climat. Si l'équilibre thermodynamique de la glace est déterminé par les échanges avec l'atmosphère et l'océan, sa dynamique dépend d'effets rhéologiques complexes. La compréhension du système climatique nécessite en toute priorité la compréhension des échanges énergétiques entre la Terre, la glace, les océans et l'atmosphère.

Milieu de vie privilégié de milliards d'êtres humains et enveloppe à travers laquelle la Terre échange de l'énergie avec le reste de l'Univers, l'atmosphère ne représente, à l'échelle de la planète, qu'une mince pellicule gazeuse. Si d'autres planètes du système solaire possèdent elles aussi une atmosphère, celle de la Terre présente la particularité d'accueillir en son sein de multiples processus biologiques dont les développements ont profondément modifié les équilibres physiques et chimiques établis lors des grands bouleversements qui ont modelé la Terre au cours des ères géologiques.

### 3 - GÉOCHIMIE ET BIOSPHERE

L'analyse des archives glaciaires conservées par les glaces polaires a confirmé le rôle de la variation de l'ensoleillement de la Terre aux hautes latitudes dans révolution à long terme du climat. L'excellente corrélation observée entre la teneur de l'atmosphère en  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ , d'une part, et la température, d'autre part, suggère fortement que ces gaz à effet de serre - c'est-à-dire qui laissent pénétrer la lumière solaire mais absorbent le rayonnement infrarouge émis par la Terre en provoquant un réchauffement de l'atmosphère - ont joué un rôle important sur les variations climatiques. En ce qui concerne l'océan à l'échelle mondiale, les reconstitutions de la circulation profonde montrent que, lors des périodes glaciaires, le renouvellement

de l'eau profonde était plus faible qu'aujourd'hui et permettait le stockage d'une plus grande quantité de  $\text{CO}_2$  atmosphérique. Les grandes oscillations climatiques s'accompagnent ainsi de modifications sensibles de la physico-chimie du système couplé océan-atmosphère et du milieu continental. En période glaciaire, l'atmosphère contenait moins de  $\text{CO}_2$  et de méthane, la végétation était moins dense et occupait une surface plus réduite, entre les calottes glaciaires des hautes latitudes et la désertification croissante de la ceinture tropicale. La biosphère, qui produit l'oxygène atmosphérique et contribue au contrôle du niveau du  $\text{C}$  transformé en carbone organique, est influencée en retour par des changements de composition de l'atmosphère et les modifications climatiques qui les accompagnent. Ainsi la photosynthèse est stimulée par l'accroissement de la teneur en  $\text{CO}_2$ . Par ailleurs, la libération dans l'atmosphère de substances biogéniques (diméthylsulfure, oxysulfures de carbone,,,) est susceptible d'influer indirectement sur la formation des nuages et l'albédo de la Terre.

Il est particulièrement difficile de comprendre révolution de la concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  car elle est régulée par l'interaction entre l'atmosphère et deux vastes réservoirs : l'océan et la biosphère continentale, où le cycle du carbone est complexe, mettant en jeu à la fois des phénomènes physiques, chimiques et biologiques. Suite aux découvertes de sources hydrothermales et de dégagement de méthane aux axes des dorsales océaniques, une nouvelle contribution aux sources de carbone a été mise en évidence. La connaissance du cycle global du carbone est fondamentale pour toute prévision d'évolution climatique d'origine anthropique : c'est ce cycle qui fixe la concentration atmosphérique du  $\text{CO}_2$  et son évolution.

### 4 - MODIFICATIONS ANTHROPIQUES

Les phénomènes régissant les équilibres naturels à la surface du globe mettent en jeu des énergies considérables, et dans le passé l'Homme a tou-

jours eu le sentiment d'être totalement démuni et impuissant face aux forces de la Nature. Cet état de fait est en train de changer, et le vingtième siècle a vu s'accroître l'échelle de l'impact de la société humaine sur la nature. Même si l'influence de chaque individu sur son environnement reste encore limitée, l'utilisation de machines de plus en plus performantes a démultiplié les possibilités humaines, et l'augmentation quasi exponentielle de la population mondiale a considérablement amplifié les dégradations de l'environnement d'origine anthropique, lesquelles ont quitté l'échelle locale pour s'étendre désormais à l'ensemble de la planète. Les rivières, les littoraux et les océans sont pollués par les rejets agricoles, industriels et urbains, et les paysages sont bouleversés par l'avancée des cultures et du déboisement.

Tous les phénomènes nouveaux affectant notre atmosphère actuelle ont donné une vive impulsion aux recherches sur les atmosphères du passé. La Terre a déjà vu, au cours des multiples variations climatiques qu'elle a subies, son atmosphère se modifier significativement. Cependant, par rapport aux variations naturelles du climat, la rapidité à laquelle s'accomplissent ces modifications de notre environnement est particulièrement inquiétante. Certes, la variation de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis le début de l'ère industrielle, de l'ordre de 70 ppmv, n'est pas sensiblement différente des variations naturelles enregistrées au cours d'un cycle glaciaire. Mais des teneurs semblables à celles observées actuellement n'ont été mesurées dans aucune des glaces polaires analysées jusqu'à présent et, ce qui est capital, ces variations naturelles se sont déroulées sur plusieurs milliers d'années, alors que l'augmentation que nous constatons aujourd'hui a demandé à peine un siècle. Les activités humaines continuent de s'intensifier, et il est désormais admis que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère aura doublé au cours du prochain siècle (augmentation annuelle moyenne de 1,5 ppmv) et que celle d'autres gaz comme le méthane biogène ou les oxydes d'azote d'origine industrielle aura augmenté dans des proportions encore plus importantes.

L'atmosphère ne se limite pas au mélange d'un gaz réactif (l'oxygène) et d'un gaz inerte (l'azote). L'importance d'autres gaz mineurs et d'une kyrielle de gaz en traces a été démontrée. Le concept d'une atmosphère à la composition fixe n'existe pas. Il faut plutôt considérer l'atmosphère comme un gigantesque réacteur chimique en équilibre dynamique, l'existence même de cet équilibre étant, désormais battue en brèche par l'action de l'Homme.

L'approche du climat se fait aujourd'hui par l'étude du comportement de la dynamique de l'atmosphère. Ces modèles prédisent que l'augmentation de l'effet de serre conduira à un réchauffement global de plusieurs degrés au voisinage du sol, c'est-à-dire à une perturbation climatique du même ordre de grandeur que la transition âge glaciaire (Würm) / Holocène. Un réchauffement de cette ampleur sera accompagné d'une élévation du niveau marin et de changements climatiques régionaux dont les impacts sur les écosystèmes et les cultures sont encore mal cernés. Cependant, ces études de sensibilité ne sont que l'embryon des études nécessaires pour comprendre l'évolution de tout le système climatique où le nombre d'interactions est beaucoup plus grand que celui actuellement modélisé.

Avant de pouvoir agir et gérer l'ensemble des problèmes environnementaux auxquels nous avons à faire face, il faut les identifier et en mesurer l'importance vis-à-vis des phénomènes naturels auxquels ils se rapportent. Un des premiers enjeux des scientifiques est donc de caractériser l'impact anthropique par rapport à l'évolution récente du système géosphère-biosphère et du climat terrestre. Mais compte tenu des constantes de temps de l'océan et de la cryosphère, les nouveaux équilibres climatiques n'ont pas le temps de se mettre en place. Or certains exemples passés montrent que le climat réagit parfois de manière non linéaire aux forçages qu'il subit, et qu'il est susceptible de variations soudaines de grande amplitude (la température des eaux de surface de l'Atlantique Nord-Est aurait ainsi subi une variation de 10° en 400 ans, il y a 12 000 ans environ).



## EVOLUTION ET TENDANCES

L'étude de la planète met en œuvre des quantités très importantes d'informations sous forme qualitative et quantitative. Cette information doit être utilisée pour comprendre et prévoir. Une difficulté essentielle vient du fait que les Sciences de la Terre ne sont pas, *stricto sensu*, des sciences expérimentales dans la mesure où, dans la majorité des cas et des sous-disciplines, une expérience ne peut être reproduite pour des raisons d'échelle et de complexité. L'outil de modélisation devra donc servir à la fois d'outil de compréhension, de prévision, et contenir sa propre validation. La complexité des problèmes et la taille du système nécessiteront l'extension des réseaux de mesures au soi, la mise en place de nouveaux réseaux, par exemple en domaines océaniques, l'utilisation des observations satellitaires, ainsi que la mise en place de systèmes informatiques capables de gérer cette masse de données.

### 1 - MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE

Les couches solides superficielles ou peu profondes ont été décrites par la géologie. La connaissance de l'intérieur de notre planète a été obtenue principalement par l'étude des champs potentiels (gravité, magnétisme) et par la sismologie. Ces approches ont été profondément renouvelées dans les dernières années.

champs potentiels ont été observés directement depuis l'espace (exemples Seasat, Geosat, Magsat...). Alors que les données avaient été, jusqu'à l'avènement des techniques spatiales, parcellaires et plutôt localisées sur les continents où avaient lieu les campagnes de mesures, des données globales ont été collectées. Ainsi, notre connaissance du champ de gravité est devenue généralement bien meilleure sur les océans, dont la surface qui s'équilibre perpendiculairement au champ de gravité est directement cartographiable depuis l'espace. De plus, la connaissance de la planète ne se limite plus

à sa partie émergée. Les sondeurs acoustiques multifaisceaux installés sur les navires océanographiques, les sondages profonds et les sous-marins ont permis la cartographie des fonds marins et l'étude de la croûte et du manteau océaniques.

La tectonique a aussi grandement bénéficié tout à la fois de l'observation de la tectonique des plaques en temps réel (exemples : GPS, Doris...) et des données fournies par les satellites d'observation de la Terre (exemples : Landsat, Spot). La déformation de la surface de la Terre peut ou pourra être suivie en continu, même dans des zones continentales peu accessibles. En domaine océanique, les observations par *seabeam* ou directement par submersibles ont mis en évidence de nombreux phénomènes insoupçonnés (exemples des circulations hydrothermales et géothermales). Les progrès en positionnement, constituent probablement l'avancée majeure en géophysique des dernières années. La qualité accrue des sismographes (larges bandes, numériques) et leur répartition géographique (exemple Géoscope) ont aussi permis la réalisation d'images tomographiques de l'intérieur de la Terre,

La modélisation de la convection à l'intérieur de la Terre, dans le manteau comme dans le noyau, a beaucoup progressé en raison des progrès méthodologiques, de l'augmentation exponentielle de la puissance de calcul des ordinateurs et de la prise en compte de nouvelles contraintes observationnelles (géochimie, gravité, magnétisme...). La modélisation des comportements du manteau terrestre qui était effectuée par des modèles bi-dimensionnels peut être approchée à trois dimensions. Les équations d'états introduites dans les modèles sont maintenant beaucoup plus proches des comportements observés en laboratoire dans des conditions de température et pression similaires à celles du manteau terrestre. L'approche numérique de la convection dans le noyau terrestre fluide est encore balbutiante, tout à la fois à cause de la complexité des équations de magnéto-hydrodynamique et à cause de l'incertitude sur les valeurs numériques des paramètres. Des modèles de laboratoire permettent, par une mise à l'échelle, de visualiser certains phénomènes tectoniques ou convectifs et

de confronter ces simulations avec les modèles numériques.

Par ailleurs, les satellites artificiels permettent actuellement la surveillance à l'échelle de la Terre des paramètres de surface du système : température superficielle de l'océan, courants superficiels, activité biologique de l'océan et de la biosphère continentale, étendue des glaces. C'est ainsi, par exemple, que l'on peut surveiller l'évolution de la déforestation et de la production primaire des mers semi-fermées. Une vision qualitative et quantitative globale de notre planète est à portée de main.

La modélisation du climat, qui se fait à l'aide de modèles tridimensionnels de circulation générale de l'atmosphère, s'est mise en place depuis une vingtaine d'années. Ces modèles n'ont pas cessé d'être améliorés en prenant en compte des processus physiques de mieux en mieux représentés. Citons le bilan radiatif, les processus convectifs, l'importance de l'orographie, ou la prise en compte, depuis deux ou trois ans, de la végétation et de ses échanges avec l'atmosphère. Cependant des insuffisances existent encore dans la paramétrisation des nuages à l'échelle du globe, notamment pour simuler des modifications de la couverture nuageuse liées à l'augmentation de l'effet de serre. L'évolution de l'atmosphère dépend crucialement des échanges avec l'océan et la glace.

L'océan est encore à un stade exploratoire. Son opacité aux rayonnements électro-magnétiques ne permet pas une approche exhaustive par télédétection. Les observations ont besoin de plateformes (bateaux) et les mesures *in situ* sont indispensables. Heureusement le développement de l'acoustique marine permet d'envisager un suivi synoptique des structures dynamiques importantes. La relative inertie de l'océan par rapport à l'atmosphère semble favoriser la modélisation océanique; mais il faut tenir compte de la taille critique des structures dynamiques, qui atteint à peine la centaine de kilomètres. La modélisation océanique a fait d'énormes progrès ces dernières années, mais elle se heurte au problème de validation, car la mise en œuvre d'un ensemble global d'observations, enjeu

du programme WOCE (*World Ocean Circulation Experiment*) en cours de réalisation, devra attendre la fin du siècle. La glace de mer est un milieu très complexe, car c'est un corps solide dont l'évolution est rapide, en déplacement entre deux fluides. Là encore, les difficultés d'observations sont très grandes, bien que l'apport des satellites soit précieux. Décrire la thermodynamique et la rhéologie de la glace en Arctique et en Antarctique est un enjeu majeur.

Il ne suffit pas de décrire les modules du système climatique indépendamment. Encore faut-il les coupler, et l'étude des systèmes couplés, qui en est encore à ses balbutiements, nous révèle de passionnantes surprises. A long terme, des effets mineurs peuvent être cumulatifs. Les modèles climatiques doivent donc être précis et robustes. Le modèle d'ensemble est nécessairement très complexe.

La modélisation du cycle du carbone dans l'océan s'appuie sur les modèles de circulation océanique en y ajoutant la représentation des phénomènes chimiques et biologiques impliquant le carbone. Elle doit aussi prendre en compte les découvertes récentes d'émission de méthane dans les sources hydrothermales des rides océaniques. Les progrès des modèles tridimensionnels de circulation océanique au cours des dix dernières années ont permis le démarrage de la modélisation du cycle du carbone dans l'océan. Ce type d'activité est appelé à un grand développement dans les années à venir, puisque c'est le seul moyen, en le combinant aux mesures satellitaires, de quantifier le rôle de l'océan dans le cycle du carbone à l'échelle globale. La modélisation du cycle du carbone dans la biosphère continentale pour quantifier le rôle de la biosphère émergée dans l'évolution de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> en est, elle aussi, à ses débuts et sera appelée à se développer.

## 2 - LA PRESSION DE L'URGENCE

Une des premières preuves que l'atmosphère terrestre pouvait changer a été apportée par les me-

sures de CO<sub>2</sub> à Mauna Loa, Hawaï, depuis 1958. En plus des variations saisonnières des concentrations de ce gaz, apparut une tendance à long terme qui a fait passer la teneur moyenne de ce gaz de 315 ppmv en 1958 à quelque 354 ppmv actuellement. Cette tendance, conséquence directe de l'utilisation par l'Homme des combustibles fossiles, révéla que la pollution pouvait se produire à l'échelle du globe. La pollution acide transfrontière des années 70 montra que ce changement d'échelle dans l'impact de l'Homme sur son environnement était bien une réalité. Le trou d'ozone polaire apparu au-dessus de la région la plus déserte, donc la plus propre de la planète, confirma l'ampleur des dégâts causés par les activités humaines. Or cette couche d'ozone est le seul bouclier réellement efficace qui nous protège du rayonnement ultra-violet solaire. L'ozone polaire et l'effet de serre dont l'évolution provient essentiellement du CO<sub>2</sub> et du méthane ont désormais relégué au second plan la question des pluies acides. Mais la pollution photooxydante pourrait bien prendre le relais, dans les années qui viennent, avec la montée préoccupante de la teneur en ozone dans la troposphère.

La Terre a subi dans son passé géologique, des variations très importantes de température, de climats, de composition de son atmosphère, de la richesse de sa biosphère. Le réchauffement qui pourrait être associé à l'augmentation actuelle des gaz à effets de serre ne s'est pas encore traduit, dans les relevés de température que nous possédons, par un signal clairement différent des variations naturelles. L'évolution des climats (température, humidité de l'air, pluviométrie) qui pourrait se produire est difficile à appréhender (quelques degrés en une centaine d'années ?),

La pression de l'urgence ne s'applique pas uniquement aux changements climatiques. A cause de la densification des populations, les risques naturels associés aux tremblements de terre, aux éruptions volcaniques, aux glissements de terrain, aux inondations vont s'aggraver. De même que vont s'intensifier les problèmes liés à la pollution, l'érosion ou le stockage des déchets.

### 3 - LES LEÇONS DU PASSÉ

La connaissance des effets des variations climatiques sur la biosphère proviendra en partie de nos connaissances paléoclimatiques et paléoécologiques.

Les effets des changements climatiques sur la chimie atmosphérique apparaissent dans les archives glaciaires. Les sédiments procurent d'autres enregistrements de l'évolution passée du climat et du pompage biologique du carbone. L'exploitation minéralogique, chimique, isotopique et biocéanologique (communautés de Foraminifères) des carottages réalisés dans différentes régions de l'Océan mondial a beaucoup apporté dans ces domaines et demeure un champ de recherche prometteur.

La paléoécologie nous renseigne sur l'évolution de la biosphère au cours des temps géologiques et permet de connaître, avec un bon degré de précision, les situations extrêmes telles que celles du dernier paroxysme glaciaire (-18 000 ans) durant lequel de vastes surfaces des terres émergées en Europe et en Amérique du Nord étaient sous les glaces. En régions intertropicales, elle nous renseigne sur les variations pluviométriques et les variations du niveau des mers. Les préoccupations concernant les changements globaux prévisibles au cours des prochaines décennies incitent à des recherches orientées vers la reconstitution des types de végétations fossiles en quantifiant, pour chaque période, le stock de carbone amassé dans la biomasse.

### 4 - COMPLEXIFICATION DES MODELES

Lorsque Ton considère les problèmes liés aux changements globaux, il devient évident que l'on ne peut isoler un composant de la Terre ; atmosphère, océan, biosphère, géosphère... pas plus que l'on ne peut isoler une échelle de temps et d'espace en raison des inter-relations énergétiques



qui existent entre ces échelles. Il est à peine besoin de souligner la nécessaire pluridisciplinarité de tous les modèles de grands ensembles. Sciences humaines, biologie, géologie, chimie, physique et mathématique sont en interactions constantes dans tous les processus planétaires. Les lois qui régissent l'évolution des composants planétaires sont connues, et il est possible que, dans le futur, le problème principal ne soit pas de construire des modèles, mais de faire communiquer des modèles entre eux par couplage (par exemple, paléogéographie/climat ou océan/atmosphère/biosphère), et hiérarchisation (petite-échelle/grande-échelle). Une telle démarche aura des implications profondes : du point de vue *méthodologique*, sur la façon de concevoir les modèles, et du point de vue *calcul*, notamment sur l'architecture des calculateurs ou des réseaux de calculateurs.

## 5 - MULTIPLICATION DES OBSERVATIONS

La densification des réseaux d'observation et l'augmentation de leur précision, par exemple en sismologie, entraînent une croissance très rapide de la quantité de données enregistrées. Ceci est encore plus vrai pour les observations spatiales. Dans un proche avenir, notamment grâce aux plateformes spatiales (exemple, le programme *Earth Observing System*), le volume des données d'observation de la Terre va être multiplié par un facteur de l'ordre de 100. Ce qui soulève plusieurs problèmes liés au choix de l'information pertinente ainsi qu'au stockage et à la disponibilité de celle-ci.

Le développement de mesures *in situ*, notamment dans l'intérieur des mers côtières et des océans, zones inaccessibles aux satellites, va de pair avec celui des observations globales. Ces séries temporelles, portant sur l'évolution du climat et des milieux, doivent s'appuyer sur la poursuite de l'effort d'instrumentation nécessaire en matière d'automates.

## 6 - EMERGENCE DE NOUVEAUX OUTILS MÉTHODOLOGIQUES

Ces dernières années, le développement de l'étude des systèmes dynamiques a apporté un outil précieux, pour la compréhension de nombreux domaines géophysiques. Une des origines de ce développement provient de l'étude des équations de Lorenz, qui sont directement issues de la schématisation d'un modèle atmosphérique. Depuis lors, ces théories ont largement dépassé leur cadre d'origine pour être appliquées à de nombreux domaines. L'application de la méthodologie de la théorie du contrôle optimal à la résolution de problèmes d'assimilation de données prend actuellement un essor considérable. Dans les centres opérationnels de prévision météorologique, cette méthode est maintenant considérée comme la méthode qui sera utilisée dans le futur.

L'utilisation des observations satellitaires nécessite la mise au point de nouveaux outils permettant de relier les quantités observées (ondes électromagnétiques diffusées ou émises par la surface terrestre) aux quantités physiques décrivant les phénomènes de surface : vent à la surface de l'océan, contenu en chlorophylle de l'océan de surface, indice de végétation des terres émergées...

En Science de la Terre solide, de nouveaux concepts ont été développés ou utilisés. Les mécanismes de génération de fractures ou de réutilisation de fractures ont été introduits en sismologie et en modélisation de la déformation. Cela permet une bien meilleure compréhension des mécanismes qui se produisent à la source d'un tremblement de terre. Les concepts de turbulence et de bifurcations sont maintenant communs dans la description de la convection dans le manteau et le noyau.

La nécessité de nouveaux concepts théoriques est aussi associée aux développements de nouvelles technologies. La géochimie a bénéficié de l'amélioration des méthodes d'analyses qui a permis d'étudier la distribution de nouveaux couples de traceurs isotopiques. La sismologie utilise mainte-

nant de sismomètres digitaux et large bandes. L'exploration des fonds océaniques par sous-marins et sondeurs a permis de découvrir des organismes vivant près de sources hydrothermales, sans lumière, et dans des conditions de hautes températures et de hautes pression.

## 7 - PLANÉTOLOGIE COMPARÉE

Nos connaissances de l'intérieur de la Terre et de ses enveloppes fluides bénéficient grandement de l'étude des autres planètes. La dynamique interne des planètes solides et leur tectonique de surface peuvent être comparées à celle de la Terre. Des satellites de glaces permettent de tester nos modèles de convection solide ou de changement de phase dans des conditions plus aisément réalisables en laboratoire que celles qui prévalent sur Terre. Les modèles climatologiques globaux développés pour notre planète peuvent être testés et adaptés aux atmosphères d'autres planètes telluriques (Mars, Vénus, Titan). Cette climatologie comparée permet de mettre en évidence les éventuels points faibles des modèles climatiques terrestres. Enfin le comportement des planètes fluides en rotation rapide a des analogies avec le comportement des noyaux métalliques fluides des planètes à champs magnétiques internes.

## LA SITUATION

Les Sciences de la Terre solide sont regroupées en France par l'INSU autour de deux grands thèmes. L'un d'eux est le programme IST (Imagerie en Sciences de la Terre), l'autre est le programme DBT (Dynamique et Bilan de la Terre).

IST groupe donc toute l'imagerie au sens large. Il s'agit aussi bien de l'imagerie optique SPOT que de la restitution de paramètres physiques à **l'intérieur** de la Terre, Ainsi, différentes tomographies

sismiques de l'intérieur de la Terre ont été obtenues. Les chercheurs français se sont principalement intéressés aux ondes de surface et au manteau supérieur. Les avancées majeures ont été obtenues dans la prise en compte de l'anisotropie et de l'atténuation. Les réseaux Géoscope et Lithoscope ont permis ces travaux. L'imagerie sismique a bénéficié du programme ECORS de sismique réflexion.

DBT fédère un certain nombre de thèmes où la dimension temporelle est toujours présente. Certains sujets ("instabilités", "fluides minéraux et cinétique" dynamique globale") portent uniquement sur la géophysique interne, mais deux thèmes "fleuves et érosion" et principalement "Changements de l'Environnement Global dans le passé" montrent une focalisation vers la problématique des changements globaux, présents et passés.

La présence française est très forte sur de nombreux sites fondamentaux pour la compréhension de la dynamique interne de la Terre, On peut citer l'étude de la collision continent-continent (Tibet), celle de la subduction sous-continentale (Andes), l'extension continentale (Afar), les bassins arrière-arc (Lau, Fidji), les dorsales médio-océaniques (Atlantique Nord, Océan. Indien), les points chauds (Réunion, Polynésie Française), les fosses océaniques (fosse du Japon).. La communauté des chercheurs français a réalisé des avancées majeures en cosmochimie et géochimie, tectonique, dynamique du noyau et du manteau, instabilités magnétiques, déformation expérimentale et minéralogie à haute pression, interprétation des anomalies magnétiques et gravimétriques d'origines crustale et lithosphérique.

Un thème fédérateur en émergence est celui de la Terre profonde. En effet, de très nombreuses études réalisées récemment permettent de mieux comprendre ce domaine. La sismologie révèle les structures du manteau profond et du noyau. Le magnétisme peut cartographier les mouvements à la surface du noyau fluide. Il suggère aussi que le champ magnétique pourrait suivre des chemins privilégiés liés à la topographie de l'interface noyau-

manteau durant ses renversements. Les conditions de température et de pression qui régissent à ces profondeurs sont maintenant accessibles à la physique du solide. Une vue synthétique de la Terre profonde est à notre portée.

Notre connaissance de la planète a été radicalement modifiée par l'observation satellitaire (météorologique, géodésique, géologique, océanographique, forestière...). La France, grâce au CNES, a pu développer une recherche de qualité à partir de ces données. La plupart des recherches dans ce domaine sont gérées par le PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale). Il convient aussi de citer le programme de positionnement Doris qui permet la collecte de données en continu et est actuellement testé sur des sites en Afar à la transition entre la dorsale indienne et l'extension continentale.

C'est dans la surveillance des paramètres de surface à l'échelle globale que l'apport des satellites est de plus en plus important et prometteur. Ceci implique, à côté de l'effort d'observation de notre planète, un effort tout aussi considérable de gestion et d'analyse des données acquises. Au sein du département Océanographie Spatiale de l'IFREMER, créé en 1991, l'entrée en phase opérationnelle du CERSAT (Centre pour l'archivage, le traitement et la diffusion en temps différé des données du satellite ERS1) s'inscrit dans cette perspective. Dans l'étude de l'environnement terrestre, un des faits marquants de ces dernières années est le lancement du Programme International Géosphère-Biosphère (PIGB) à partir de 1986.

À l'échelle nationale un comité exécutif assure le pilotage de la participation française au PIGB dont les programmes ont comme noms PNEDC, JGOFS-FRANCE, PAMOS, Phase Atmosphérique des Cycles Biogéochimiques, Interaction des Écosystèmes terrestres et Littoraux avec le climat. S'inscrivent aussi dans cette vocation les thématiques Cycles Biogéochimiques et Évolution à long terme du Programme National d'Océanographie Côtière (PNOC, INSU-IFREMER) et le Programme Récifs Coralliens CPRCO, INSU-ORSTOM).

Des actions plus ponctuelles ont été lancées par le secrétariat d'État à l'Environnement sur les effets de la pollution sur les forêts (DEFORPA) et sur l'évolution du climat et de l'atmosphère (ECLAT). Ces programmes en cours permettent aux chercheurs français d'être présents - et même d'occuper des positions de premier plan - en paléoclimatologie, sur le cycle du carbone, sur l'atmosphère et l'océan, tant en régions tropicales que tempérées ou polaires.

Des observatoires à long terme de l'atmosphère terrestre ont été mis en place ou sont en cours d'installation à l'observatoire de Haute-Provence, à la Réunion et à Dumont d'Urville (puis au Dôme C). L'île d'Amsterdam accueille une station de suivi des teneurs en CO<sub>2</sub>. Dans le domaine marin, cette vocation d'acquisition de longues séries est à développer dans les stations marines, en tant qu'observatoires de l'INSU. Les chercheurs français occupent également une place importante dans la surveillance de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'océan et dans la modélisation du cycle du carbone. La surveillance sur l'ensemble de l'océan du coefficient d'échange air-mer par satellite est une exclusivité de la communauté française.

La France a développé des modèles de circulation générale tout à fait compétitifs. Ceux-ci ont permis d'intervenir dans les grands programmes internationaux sur l'étude de la variabilité interannuelle du climat (liée notamment au phénomène d'El Niño et à la mousson indienne), l'effet du CO<sub>2</sub> sur le climat ou la compréhension des interactions entre biosphère et climat. Le PNEDC, dans le passé, a permis un regroupement des différentes disciplines (physiciens et chimistes de l'atmosphère, de l'océan, hydrologues, spécialistes des paléoclimats), les chercheurs français interviennent dans de nombreux programmes internationaux (GEWEX, WOCE, TOGA, IGBP) ou européens (EPOCH, collaboration sur le centre européen ECMWF).

La validation, dans le cadre du climat actuel, des maillons atmosphériques et océaniques est un domaine pour lequel la France est particulièrement bien armée. Depuis plusieurs années, une collabo-



ration active s'est établie entre les spécialistes de la modélisation et ceux de l'observation. Cette collaboration s'est traduite par plusieurs programmes expérimentaux coopératifs dans des domaines variés (Cycle de l'eau à [l'interface sol-plante-atmosphère, dissipation d'énergie par turbulence dans la couche limite atmosphérique, influence du relief sur la circulation atmosphérique, flux à l'interface océan-atmosphère, rôle des convectifs dans la circulation générale, ...). Pour chacun de ces programmes, un volet de modélisation numérique permet de déterminer des représentations optimales simplifiées des phénomènes observés (dites "paramétrisations") qui sont injectées dans les modèles climatiques pour améliorer leur réalisme. Ces études sont réalisées dans le cadre du Programme Atmosphère Météorologique et Océan Superficiel (PAMOS) de l'INSU, et du PNEDC. Elles ont suscité des développements instrumentaux de grande importance (avions de recherche, réseaux de radars et de bouées).

Dans les sciences de l'océan, la compréhension de la circulation en tant que composante essentielle dans révolution du climat est l'objet du programme international WOCE. Plus généralement, les dernières périodes ont vu les équipes développer des approches interdisciplinaires intenses et un couplage accru physique/biogéochimie/géochimie pour répondre aux questions actuelles liées à la problématique "changement global" et développer des modèles biogéochimiques à diverses échelles. En particulier, l'océanographie biologique n'est plus une simple utilisatrice de contraintes abiotiques pour ses modèles qualitatifs, mais une discipline interagissante dans l'étude du système océan global. Ceci est illustré, par exemple, par le rôle de la "pompe biologique" dans le cycle du carbone et la nécessité de quantifier des fonctions biologiques antagonistes pour aboutir à un bilan dynamique du carbone dans l'océan. Cette évolution nécessite la compréhension de plus en plus fine des processus importants (jusqu'au niveau cellulaire) et leur intégration dans une approche interdisciplinaire de plus en plus globalisante.

Un effet de la volonté de prédiction de la réponse de l'océan à de nouvelles contraintes

conduit à construire des modèles numériques avec une composante biologiques pour simuler les grands flux. Le travail de réflexion sur ces modèles a parfois commencé en amont des opérations, comme un élément préalable pour la conduite des opérations *in situ* et expérimentales. Cela a été pris en compte et encouragé par le programme JGOFS-FRANCE et se développe selon une démarche parallèle dans les mers côtières avec le lancement du PNOC,

Dans le domaine océanique profond, la communauté scientifique se mobilise sur l'étude des dorsales médio-océaniques, lieux d'échanges entre l'océan et la lithosphère. Ceci se traduit par la mise en place d'un comité Dorsales qui représente la contribution française au programme InterRidge (*International Ridge Inter Disciplinary Global Experiment*). Ce programme a pour but de comprendre les causes et les conséquences géophysiques, géochimiques et biologiques du transfert d'énergie qui a lieu aux dorsales. Trois grands thèmes sont retenus :

- la reconnaissance des dorsales peu ou pas explorées, notamment dans les mers australes,
- les études des flux de matières et d'énergie entre les océans et la lithosphère, aux dorsales et dans les bassins arrière-arcs,
- les études de sites hydrothermaux et de leurs variations temporelles.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

L'impact social des problèmes environnementaux pousse l'opinion publique et les politiques à des actions qui ne sont pas entièrement légitimées par la recherche scientifique. L'augmentation atmosphérique des gaz à effet de serre, la diminution de

la couche d'ozone ou la déforestation sont des phénomènes aux enjeux énormes. Cependant d'autres modifications de grandes amplitudes ont déjà eu lieu dans le passé. Les écosystèmes à toutes les latitudes n'ont cessé de se modifier. La compréhension de la problématique du climat ne pourra pas être résolue par la seule observation de l'état présent de la planète superficielle, mais par l'intégration des connaissances couvrant les champs de compétence de toutes les Sciences de la Terre.

L'étude de l'intérieur de la planète, noyau et manteau, passe de façon incontournable par la mesure des champs magnétique et gravitaire. A l'échelle globale, de nombreuses zones géographiques sont malheureusement très mal connues. La méconnaissance du champ de gravité affecte non seulement notre connaissance de l'intérieur de la Terre, mais aussi pénalise d'autres domaines de recherche. Ainsi, l'utilisation des satellites géodésiques de positionnement serait facilitée par une connaissance plus précise des orbites, et l'océanographie bénéficierait d'un niveau de référence pour les surfaces océaniques. Les variations temporelles du champ magnétique sont une des rares indications que l'on puisse avoir sur la dynamo terrestre. Celles du champ de gravité peuvent fournir des contraintes sur les dernières glaciations ou sur l'évolution actuelle du niveau marin. Un certain nombre de projets de mesure des champs potentiels par des satellites ont échoué pour des motifs plus conjoncturels que scientifiques. La nécessité de ces mesures reste pourtant d'actualité.

La sismologie a grandement bénéficié de l'installation du réseau mondial Géoscope. Cependant ce réseau - comme tous les autres réseaux - est pénalisé par une distribution géographique inégale des stations. Une meilleure distribution qui permettrait, par exemple, une meilleure étude de l'anisotropie sismique passera par le développement de stations sismographiques sous-marines. De façon plus générale, les océans qui couvrent les deux tiers de la planète contiennent une information indispensable pour comprendre la dynamique et révolution de la Terre. L'installation d'un réseau

permanent d'observatoires sous-marins, géophysiques, géochimiques et biologiques doit être étudiée.

Les hétérogénéités de la croûte terrestre peuvent être mise en évidence par les méthodes de la sismique. Jusqu'à présent seules des coupes bi-dimensionnelles peuvent être obtenues. Le développement de la sismique tridimensionnelle demande l'utilisation simultanée d'un très grand nombre de stations. La mise au point d'un tel outil pour sonder la croûte aura des implications profondes pour la recherche pétrolière et pour le développement de méthodes et d'algorithmes pouvant s'appliquer à la tomographie à l'échelle de la planète.

Si la tectonique des plaques rigides permet de prendre en compte le comportement approximatif de presque toutes les frontières de plaques, les arcs alpin et himalayien sont le lieu d'une déformation continue qui semble affecter la majeure partie de l'Asie du Sud-Est. Les outils de positionnement (GPS, Doris) sont particulièrement indiqués pour comprendre cette Tectonique et doivent être utilisés en conjonction des autres techniques géophysiques et géologiques. Le nombre de balises pour le positionnement doit être renforcé.

Le niveau d'éclairement du soleil est un paramètre fondamental jouant sur le climat moyen terrestre. Cependant nous ne savons toujours pas si ce niveau a varié de façon significative dans le proche passé, à l'échelle de quelques centaines de milliers d'années. D'autre part, l'activité solaire (taches et vent solaire) et son cycle de onze ans semblent présenter des corrélations avec des données climatiques dans des régions localisées, tandis que les corrélations avec des indices globaux comme, par exemple, la température moyenne de la surface du globe ne sont pas clairement établies. La surveillance fine du soleil doit s'inscrire dans notre effort de compréhension globale des facteurs d'évolution climatique et atmosphérique.

L'évolution à long terme des teneurs atmosphériques en composés minoritaires (dont l'ozone) doit être suivie en continu depuis le sol. Dans cette

optique, il est impératif que l'équipement de la future base Antarctique du Dôme C soit réalisé dès l'ouverture de la station (prévue pour 1994-95) notamment pour suivre la chimie de l'ozone stratosphérique polaire dans les meilleures conditions.

Pour comprendre l'effet de modifications de la quantité de gaz carbonique dans l'océan, il convient de mieux connaître la répartition et la taille des réservoirs actuels de carbone organique. Certains grands biomes (forêts humides, savanes, steppes...) sont à cet égard encore insuffisamment connus, bien que plusieurs grands programmes leurs soient consacrés (PNEDC, EPOCH, IGBP...). Il convient aussi de poursuivre notre effort de recherche pour décrire les relations entre les cycles volcano-tectoniques des dorsales, la circulation hydrothermale et le bilan chimique de l'océan, La chronologie des datations ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ...) doit être affinée, et la surveillance continue de la composition isotopique des composés carbonés dans l'atmosphère permettant d'identifier les sources et les puits de  $\text{CO}_2$ , assurée. La surveillance de la concentration du gaz carbonique dans l'océan de surface, beaucoup plus ardue qu'elle ne l'est dans l'atmosphère du fait de la grande variabilité spatio-temporelle de l'océan, doit être assurée au moins dans des observatoires fixes judicieusement répartis. La France a de bonnes compétences pour le faire. La durée de vie des constituants chimiques à effet de serre et le temps de réponse des écosystèmes présents et passés aux stress climatiques doivent être plus étudiés. Une des missions importantes de la paléoécologie sera consacrée à la validation des modèles prédictifs dans l'hypothèse de l'augmentation des gaz à effet de serre. C'est en effet à partir de la reconstruction des situations du passé décrivant révolution des formations végétales et précisant les chronologies que l'on pourra apprécier correctement le degré de crédibilité des différents scénarios proposés par les climatologues. La connaissance de l'environnement passé à l'échelle des 500 000 dernières années dépendra en grande partie de la poursuite du carottage glaciologique russe à Vostok (actuellement arrêté à 200 000 ans), et surtout de la mise en route rapide de celui du Dôme C dont la France sera le

maître d'oeuvre dans le cadre d'EPICA (*European Project of Ice Coring in Antarctica*). De même, la poursuite des recherches paléoclimatiques et paléoécologiques à partir des enregistrements sédimentaires océaniques est de première importance pour comprendre le fonctionnement global de l'océan et son rôle dans le cycle du carbone sous diverses conditions climatiques.

Prédire l'état de la planète d'ici un siècle et son habitabilité pour notre espèce ne peut être déduit d'une simple extrapolation des tendances actuelles fournies par les stations du réseau météorologique mondial. Le système d'observations doit s'étendre à l'océan, à la végétation et à de nombreux composants chimiques mineurs. Toute tentative de prédiction doit reposer sur une modélisation de l'évolution de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (gaz carbonique et méthane surtout) et du climat. Il est indispensable de développer un modèle couplé de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan. Des progrès considérables ont déjà été réalisés : simulation des climats à l'aide de modèles de circulation générale atmosphérique, description des grands traits des cycles biogéochimiques des éléments les plus importants (C, S, N), simulation de la réponse de quelques écosystèmes aux changements de conditions météorologiques moyennes. Mais prédire révolution du climat soumis aux perturbations actuelles nécessite encore de mieux comprendre des interactions d'une complexité certaine telles que bilan radiatif et cycle de l'eau, ou interactions océan-atmosphère.

Il convient aussi d'effectuer une régionalisation des modèles qui est indispensable pour étudier l'impact humain de l'évolution des climats. Les conséquences de l'incertitude des modèles doivent aussi être prises en compte ainsi que leurs impacts dans l'opinion publique, les médias et la sphère politique. Il serait bon qu'un forum se mette en place au sein du CNRS où l'ensemble de ces questions soit brassé de façon à la fois interdisciplinaire et rigoureuse. Une réflexion constructive sur l'interdisciplinarité est une tâche indispensable qui exige la présence non seulement des sciences dures



connexes, météorologie, océanologie, géologie mais aussi celle des juristes, sociologues, économistes...

Plusieurs périodes du passé méritent un renforcement des recherches, en particulier la période couvrant les 30 derniers millénaires. En effet, ses écosystèmes, sa flore, sa faune sont pratiquement identiques à ceux que nous connaissons aujourd'hui. Durant cette période, la Terre a subi un réchauffement moyen de l'ordre de  $3^{\circ}$ , c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celui prévu par certains modèles au cours des 50 prochaines années. La paléocéologie fait état de phénomènes locaux de sécheresse, de savanisations, d'évolutions lacustres, de déplacements de zones pluviométriques... indépendants d'actions anthropiques : les enseignements de ces recherches devraient permettre de mieux appréhender les prévisions des évolutions des écosystèmes terrestres et aquatiques dans les prochaines décennies.

Un effort pluridisciplinaire doit être fait, incluant des géophysiciens, des mathématiciens, des mécaniciens et des spécialistes de toutes les disciplines concernées par le fonctionnement de la biosphère. Notamment, il est nécessaire de former des étudiants qui aient une bonne connaissance de la physique et de la mathématique de ces problèmes et donc d'encourager les DEA et les séminaires interdisciplinaires. Une formation combinée technologique et scientifique, particulièrement pour les recherches tournées vers l'océan, fait actuellement défaut.

En matière de calcul, il est prévisible que des options très importantes devront être prises, notamment en matière d'architecture des machines. A l'heure actuelle, les choix n'apparaissent pas clairement, tout au moins sur le calendrier à envisager. Un effort important de réflexion doit être engagé dans ce sens. Les progrès des moyens informatiques suivent deux axes clairement identifiables. L'un est lié à l'augmentation quasi exponentielle des capacités des gros ordinateurs, l'autre à la connectivité des machines.

Pour la modélisation du climat, les machines d'architecture vectorielle classique restent pour l'instant l'outil majeur. Des nouvelles machines, massivement parallèles comme la Connexion Machine, permettent la simulation de processus toujours plus complexes, en sismologie ou en dynamique du manteau par exemple. Le suivi par le CNRS des architectures les plus modernes proposées sur le marché est indispensable. Le gouvernement des Etats-Unis vient d'adopter un plan de développement du calcul intensif (*High Performance Computing*) portant sur un budget de 9 milliards de dollars pour une période de cinq ans. Il est important qu'en France aussi, les efforts soient intensifs.

Les laboratoires se sont massivement équipés en matériel de type stations de travail. Ce matériel permet de travailler en réseaux et cette connectivité est indispensable à la science moderne. Cependant ce matériel suscite deux problèmes dans les laboratoires. Le premier est lié à sa courte durée de vie qui oblige à le remplacer tous les trois ou quatre ans. Le second consiste trop souvent à faire supporter par les chercheurs un travail de maintenance complexe (installation de nouveaux logiciels, réactualisation des systèmes d'exploitation, connexion avec les périphériques...) dû au manque de personnel technique qualifié. Un effort important doit être fait par le CNRS pour recruter et former ce type de personnel.

Malgré la grande importance des données spatiales, il est clair que les agences spatiales (américaine, européenne, russe...) sont soumises à des impératifs financiers et politiques qui ne permettent pas l'exécution de toutes les missions dont nous aurions besoin. Il convient que le rendement de ces missions soit optimisé par une grande implication des scientifiques aux définitions des programmes et une politique cohérente de soutien aux équipes qui peuvent utiliser les données spatiales, le traitement systématique des données d'observation de la Terre nécessite des moyens informatiques adaptés, différents de ceux destinés à la modélisation, ainsi qu'un personnel technique compétent dans le traitement et la gestion de gros volumes de données.

Le formidable impact social des problèmes environnementaux demande une implication plus grande des scientifiques dans la vulgarisation et les médias. Ce type d'activité a été un peu délaissé jusqu'ici parce que les structures de promotion et d'évaluation de la recherche n'y incitent guère.

L'importance des problèmes environnementaux peut donner l'impression que notre planète était dans un état stable et se dirige vers un état instable. Il s'agit là de l'effet d'une profonde myopie. À l'échelle des temps géologiques, des variations de très grandes amplitudes de température, du niveau des mers, de la composition de l'atmosphère ont eu lieu. Ces phénomènes font intervenir des couplages entre tous les étages de la dynamique de notre planète. La quantité de carbone piégée dans les sédiments et le niveau de la mer sont reliés à l'activité biologique marine passée, elle-même conditionnée par l'évolution de la circulation océanique aux variations de la convection mantellique, à la longueur

et à la vitesse des zones de subduction et des dorsales. L'activité du noyau est probablement très importante pour la biosphère. Pendant les périodes d'activité où le champ magnétique se retourne, il semblerait que de nombreux panaches thermiques soient émis dans le manteau, créant d'immenses plateaux volcaniques et modifiant la topographie et le climat de la Terre. Pendant ces mêmes inversions, l'absence de bouclier magnétique soumet directement la biosphère au bombardement du rayonnement cosmique. L'étude de toutes les crises passées de la Terre doit donc fournir une leçon pour l'avenir. Elle s'ajoute naturellement au développement de nos capacités à modéliser les processus physiques, chimiques et biologiques impliqués dans la dynamique de notre système planétaire.

**Yanick Ricard**

*Président du groupe 14*

# 15

## MILIEUX, RESSOURCES, ÉCOSYSTÈMES, RISQUES

Ce chapitre prolonge pour une part la réflexion qui avait été menée lors de l'élaboration du chapitre 13 *"Environnement, écosystèmes et ressources génétiques"* du précédent rapport, dont certains paragraphes, toujours d'actualité, ont d'ailleurs été repris en partie. Toutefois, le présent texte a pris davantage en considération le problème de l'exploitation des ressources et des risques qui en découlent, ce qui a permis d'élargir la communauté scientifique intéressée aux chimistes, géographes, géologues et physiciens, ainsi qu'aux spécialistes des sciences humaines et sociales, du droit et de l'économie. En revanche deux aspects intéressants la gestion de la biosphère, celui de la diversité génétique et celui de l'effet de serre ne sont que peu abordés dans ce chapitre, étant traités d'une façon plus complète dans les chapitres 17 (*Evolution ; du génome aux biosystèmes*) et 14 (*la terre: dynamique et changement global*).

Les limites du champ de ce chapitre, par rapport aux autres chapitres du présent *Rapport* (et, en particulier, par rapport au chapitre 14) se situent au niveau des échelles locales et régionales et des périodes actuelles, historiques et préhistoriques.

### INTRODUCTION

Dans tous les milieux où la vie est possible, les organismes exploitent les ressources disponibles, se développent et interagissent avec le milieu. Il en résulte un équilibre dynamique dont la stabilité dépend de nombreux paramètres externes et, maintenant, de l'influence croissante de l'homme. En effet, depuis que l'homme est apparu à la surface de la terre (de l'ordre de trois millions d'années), il est passé, en un temps géologiquement très court, de la stricte utilisation des ressources renouvelables (eau et biomasse) à celle d'énergies fossiles (charbon, pétrole), puis à d'autres sources d'énergie, dont l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, une nouvelle étape vient d'être franchie : l'homme est capable d'introduire, dans les systèmes biologiques, des organismes génétiquement modifiés ainsi que *des* molécules de synthèse dont les effets sur le fonctionnement des systèmes écologiques sont pour une grande part encore inconnus. De plus, les répercussions de ces transformations technologiques sur notre environnement ont pris une ampleur sans précédent du fait de l'explosion démographique actuelle. En fait, c'est une grande spécificité de l'homme qui, seul de tous les êtres vivants, dans sa recherche de sources



d'énergie, de matériaux et d'espace pour assurer ses besoins alimentaires et ses besoins énergétiques, son confort et ses loisirs, a le pouvoir de transformer son environnement, y compris maintenant à l'échelle planétaire. Ses activités engendrent des modifications permanentes des équilibres environnementaux, sociologiques, économiques et politiques, et ceci à tous les niveaux d'intégration, de la molécule à la biosphère et de l'échelle individuelle à l'échelle planétaire.

## LE CHAMP COUVERT ET LES ENJEUX

### 1 - LE CHAMP COUVERT

Les trois premiers mois proposés dans le titre de ce chapitre se réfèrent en fait aux fonctionnements de systèmes écologiques; mais l'association à ces termes du mot "risques", voulue dans l'intitulé, sous-tend clairement l'intervention de l'homme, dont le rôle vis-à-vis de l'environnement provoque des modifications de la structure et de la dynamique des écosystèmes, qu'ils soient exploités ou non.

Mais, avant toute chose, il importe de définir les mots-clés de ce chapitre, entendus souvent de façon différente :

- les "*milieux*" sont caractérisés par l'ensemble des propriétés physiques, chimiques et biologiques qui régissent la répartition et le développement des organismes et des communautés qu'ils renferment dans un espace homogène donné. Pour la plupart des biologistes, le milieu exclut les interventions humaines : c'est dans ce sens que nous emploierons ce mot; toutefois, pour les spécialistes des sciences humaines et sociales, le milieu est caractérisé par la présence de l'homme et de ses activités (milieu social, milieu artistique, milieu urbain, etc.);

- les "*ressources*", pour les sciences biologiques, sont constituées par "tout élément du milieu exploitable pour l'accomplissement des différentes fonctions nécessaires à l'être vivant (survie et reproduction)"; mais la notion de ressources, dans ce chapitre, aura en fait une connotation beaucoup plus large, humaine et sociale, et englobera aussi diversité biologique, temps, espace et patrimoine culturel. Les ressources disponibles pour un système biologique donné ne sont pas accessibles uniformément à tous les organismes vivants de ce système. La diversité du mode d'utilisation des ressources est liée à la structure, la richesse et la dynamique des communautés, et il est évident aussi que la diversité du mode de gestion et d'exploitation des ressources par l'homme varie en fonction de ses connaissances, de son génie et de son patrimoine culturel;

- les "*écosystèmes*" correspondent à des unités fonctionnelles homogènes de la biosphère caractérisées par leurs composantes biotiques et abiotiques spécifiques. Pour Odum, les écosystèmes sont des unités d'organisation biologique composées d'organismes vivants dans un espace donné qui présentent des interactions avec le milieu physico-chimique. Le fonctionnement d'un écosystème suppose, de ce fait, une source d'énergie (généralement l'énergie solaire, mais ce peut être aussi l'énergie chimique des sources hydrothermales des profondeurs océaniques), des organismes qui puisent les éléments nécessaires à leur activité (eau et substances minérales présentes dans le sol, par exemple) et des transformations de matières tout le long de chaînes trophiques qui aboutissent à une production de substances organiques végétales (production primaire) ou animales (production secondaire) ou même minérales ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ , etc). La communauté des êtres vivants d'un écosystème évolue sans cesse autour d'un équilibre moyen tant que les conditions du milieu ne dépassent pas certains seuils au-delà desquels le fonctionnement de l'écosystème change radicalement. L'écosystème est caractérisé de ce fait par une forte non-linéarité de son fonctionnement (instabilités, effets de seuil, rétroactions, synergies...);

- les "*risques*" de perturbation du fonctionnement des écosystèmes sont de deux natures : les risques naturels et les risques technologiques. Dans les deux cas, l'aléa est lié à une probabilité d'occurrence d'un événement d'une ampleur donnée, en un lieu donné, dans un laps de temps donné, qu'il soit d'origine naturelle ou d'origine anthropique. Dans ce dernier cas, les perturbations sont le plus souvent attribuables à une méconnaissance de l'impact d'un phénomène externe sur le fonctionnement du système avec effet immédiat ou effet différé, à la suite par exemple d'une accumulation de déchets, d'apports de nouvelles molécules chimiques dans l'écosystème, d'un appauvrissement des ressources, d'une perte de la biodiversité;

- quant au mot "*environnement*", il sera pris dans la même acception que celle définie par le Programme Environnement du CNRS, à savoir l'environnement de l'homme, c'est-à-dire l'ensemble des facteurs physiques, chimiques et biologiques qui entourent les êtres humains dans des milieux exploités ou non.

## 2 - LES ENJEUX

L'exploitation des ressources par l'homme à l'échelle planétaire perturbe l'environnement. Cette exploitation est caractérisée par une intensification des prélèvements, un appauvrissement du stock des ressources renouvelables ou non renouvelables, et une augmentation des rejets qui modifient le fonctionnement des écosystèmes et peuvent entraîner des conséquences fâcheuses ou dangereuses pour l'homme et la société. L'enjeu principal de ce chapitre correspond donc à l'étude des conditions de compatibilité à long terme entre le développement des activités humaines et les ressources de la biosphère. Cette maîtrise des conditions de gestion de la biosphère est en fait, dès le départ, hypothéquée par quatre grands facteurs : l'explosion démographique, le développement technologique, l'augmentation du niveau de vie des sociétés modernes, et enfin la sensibilisation de plus en plus forte des populations aux problèmes environnementaux.

- Le problème de la *démographie mondiale* et de son explosion récente est le problème le plus marquant. La population mondiale actuelle est estimée à 5,4 milliards d'individus; elle était de 2,5 milliards en 1950 et a doublé en 35 ans. Le régime démographique ancien était caractérisé par une forte fécondité et une forte mortalité; le régime démographique nouveau (celui des pays développés) présente une fécondité et une mortalité faibles liées au progrès de la médecine. Mais la transition démographique actuelle est totalement déséquilibrée du fait que, dans la plupart des pays en voie de développement, la fécondité reste élevée alors que la mortalité a beaucoup diminué. Un nouvel équilibre ne s'établira pas de sitôt, car, pour toute projection dans le futur, on doit tenir compte de la pyramide actuelle des âges - quelles que soient les décisions prises par les responsables gouvernementaux - et de l'effet de latence liée à toute initiative politique sur le sujet, comme on a pu le constater avec la politique volontariste de la Chine prise depuis les années 70. Les projections les plus raisonnables prévoient une stabilisation de la population entre 2050 et 2100 avec un chiffre se situant autour de 10 milliards d'individus sur la planète, sauf événements catastrophiques imprévisibles. Le rapport démographique entre pays développés et pays en voie de développement, actuellement de 1 à 4, sera en 2050 de 1 à 9, et 65 à 75 % de la population vivra dans des pôles urbains dont certains atteindront 30 millions d'habitants.

- Le *développement technologique* progresse de façon ambivalente vis-à-vis de l'environnement : d'un côté il s'accompagne d'une production de déchets de plus en plus importante (rejets d'extractions, déchets urbains, molécules de synthèse, produits radio-actifs, etc.) qui vont perturber directement ou indirectement le fonctionnement des écosystèmes; de l'autre, en réduisant les quantités d'énergie pour la fourniture d'un service donné et en utilisant de façon de plus en plus efficace les matériaux, il diminue les pressions exercées sur ces mêmes écosystèmes.

- l'*augmentation du niveau de vie*, du besoin de confort et de loisirs des civilisations modernes se

caractérise par un accroissement des dépenses énergétiques par individu (estimées à 12 000 kcal/jour au néolithique, elles sont aujourd'hui de 230 000 dans les pays développés) et par une augmentation considérable de la production de déchets (2,5 kg/jour/habitant aux Etats-Unis actuellement).

- Enfin la *sensibilisaion grandissante des populations aux problèmes de l'environnement* (catastrophes écologiques, pollutions, perte de la biodiversité, dégradation des paysages), même si elle reste encore insuffisante et souvent mal hiérarchisée, prend, de par le monde et par l'intermédiaire des médias et de quelques instances internationales, une importance de plus en plus grande. Elle représente une pression qui s'affirme de plus en plus fortement (cf. l'impact médiatique de la conférence de Rio en juin 92),

Dans ce contexte ainsi défini, les enjeux sont nombreux et importants.

## Enjeux scientifiques

Il s'agit d'améliorer les connaissances et la compréhension du fonctionnement et de la structure d'un certain nombre d'écosystèmes représentatifs par des quantifications faites à différentes échelles de temps et d'espace qui permettront d'estimer les ressources disponibles, et leur évolution probable à l'échelle locale et à l'échelle globale. Cette démarche aboutira à rétablissement de modèles de fonctionnement et à l'élaboration de diagnostics objectifs sur les potentialités et contraintes d'exploitation des systèmes biologiques et les interactions milieu-société qui. s'ensuivent, en se référant aux usages et pratiques actuels et passés. L'évaluation de la variabilité des réponses des écosystèmes à des variations de facteurs externes (climatiques ou anthropiques), par extrapolation de recherches menées au laboratoire, aura des retombées efficaces dans les domaines de la recherche appliquée, par exemple en écotechnologie de la restauration. Ces enjeux posent le problème du rôle du scientifique face aux problèmes d'environnement. Le scientifique doit initier des recherches de type fondamen-

tal qui lui permettront de mieux connaître les lois et les interactions qui régissent l'environnement. Ces connaissances serviront de référence pour établir des diagnostics face à la situation actuelle et émettre des hypothèses ou proposer des solutions qui engagent son autorité et sa crédibilité face à des situations nouvelles, parfois catastrophiques. Il devra être un partenaire reconnu dans un dialogue avec les aménageurs, les décideurs, les utilisateurs et les consommateurs.

## Enjeux environnementaux

La combinaison d'une démographie galopante et d'un développement technologique mal orienté pourrait conduire à une surexploitation des ressources et à l'accroissement de la production de déchets plus ou moins recyclables, à la dégradation croissante de l'environnement, à l'augmentation des risques liés aux aléas naturels et à l'apparition de nouveaux risques liés aux activités humaines (industrie, transport, production agricole). Face à ces enjeux, le scientifique doit faire connaître les dangers et proposer des solutions restauratrices.

## Enjeux techniques et technologiques

Il s'agit de créer des matériaux nouveaux recyclables, de développer des techniques originales permettant de réduire les impacts négatifs de l'activité humaine, de mieux, estimer l'abondance et la répartition des ressources dans un objectif de gestion et de sauvegarde des ressources renouvelables, d'épargne des ressources non renouvelables et d'élimination des déchets sur place. Une démarche intégrant, dès la réflexion sur la gestion des ressources, l'ensemble des cycles et des risques industriels, en particulier, doit, être adoptée systématiquement. Il faut développer une instrumentation spécifique adaptée aux problèmes d'environnement (métrologie de terrain, capteurs, techniques d'analyses fines de laboratoire, gestion de bases de données), définir des normes et mettre au point des techniques de réhabilitation des milieux et des ressources, de prévention et de réduction des risques.



## Enjeux politiques, économiques et juridiques

Il s'agit de trouver et de proposer un équilibre à long terme entre gestion et protection de l'environnement assurant un nécessaire développement de chaque pays face à la pression démographique. Les solutions proposées doivent garantir l'accès des populations à des ressources souvent limitées (l'eau est devenue par exemple source de conflit à l'échelle continentale, avec la gestion des grands fleuves, à l'échelle régionale, avec les conflits entre zones urbaines et rurales, et même à l'échelle individuelle). Il faut gérer et arbitrer des usages multiples et souvent concurrents concernant les ressources et la protection de l'environnement. Le scientifique doit identifier les vrais problèmes et hiérarchiser les facteurs de perturbation du fonctionnement des écosystèmes, Il a son mot à dire dans le cas de phénomènes spectaculaires très médiatisés, mais il doit aussi signaler les perturbations chroniques plus insidieuses. Il doit pouvoir proposer des solutions en face de l'imprévisible et aider à gérer, au moins partiellement, l'incertitude avec le minimum de risques.

Il s'agit aussi de définir un véritable secteur d'économie de l'environnement qui donnera une estimation de la valeur économique du patrimoine naturel à transmettre - qu'il soit génétique ou culturel -, du coût d'usage et du coût de prévention par rapport au coût de réhabilitation des dégradations. Le politique devra alors, en connaissance de cause, définir et imposer des règlements (définition de normes, études prénormatives, taxes incitatives, amendes) et mettre en place des instances légales nationales et internationales qui géreront l'environnement et assureront une véritable gestion patrimoniale.

## Enjeux sociaux et culturels

Le scientifique, de par son rôle dans le progrès des connaissances, doit aider les individus et les sociétés à saisir les risques d'une négligence des rapports homme-environnement. Devant le caractère

international des mécanismes de régulation en cours de gestation et devant l'ampleur des intérêts impliqués, il constitue, en gardant de façon stricte une posture de rigueur scientifique, un garde-fou sans lequel il sera difficile de maîtriser les conflits potentiels au sein des états et, à l'échelle internationale, les conflits engendrés par toute négociation sur la prise en charge des risques environnementaux. L'enjeu évident d'une telle démarche est l'émergence au niveau mondial d'une nouvelle forme de citoyenneté participative qui remplacera l'individualisme des citoyens des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles.

## L'EVOLUTION ET LES TENDANCES

### 1 - MISE EN PERSPECTIVE HISTORIQUE DU CHAMP

Le champ des recherches environnementales n'a émergé comme tel que récemment (autour des années 70 pour les échelles locale et régionale, et 80 pour l'échelle globale), même si depuis toujours les sociétés ont appris il gérer, au moins partiellement et quelquefois avec grand succès, leur environnement. Cette émergence récente explique le manque de recul et de références initiales qui permettraient de mieux caractériser nombre de problèmes environnementaux et leur évolution récente. Pourtant ce type de recherches a initié depuis longtemps, directement ou indirectement, des problématiques diverses dans de nombreuses disciplines. Si, par exemple, des études quantitatives sur le cycle de Peau ont été menées à l'échelle régionale pour résoudre des problèmes de ressources en eau ou de maîtrise de débits, les pollutions récentes, les problèmes actuels d'érosion, de sécheresse et d'inondation et les changements observés ont donné une impulsion nouvelle aux recherches

hydrologiques, abordées d'une façon plus globale, du cycle de l'eau dans les sols et les formations superficielles. Longtemps limitées aux zones de montagne et aux milieux tropicaux et méditerranéens, les recherches sur l'érosion des sols s'étendent actuellement, avec de nouvelles approches, aux zones de grandes cultures en milieu tempéré affectées par la transformation des pratiques culturales. Même l'astronomie est de plus en plus confrontée à des nuisances lumineuses et à des interférences radio-électriques, l'obligeant à déplacer ses observatoires des centres urbains vers des sites ruraux, montagnards ou même désertiques, et réclame des plages de fréquences réservées pour maintenir la qualité de ses observations. Quelque peu délaissées au profit des échelles subcellulaires et moléculaires, les recherches faites à l'échelle des organismes et des écosystèmes connaissent un nouveau développement. Les problèmes liés au dépérissement forestier et au défrichement massif des forêts en milieu intertropical ont récemment conduit à un net regain des recherches sur l'arbre et les écosystèmes forestiers. De même, après une longue période de désaffection officielle pour les études de systématiques menées sur les espèces animales ou végétales, les problèmes d'érosion de la biodiversité spécifique ont souligné l'intérêt des activités des systématiciens,

A l'échelle globale, l'ampleur du problème et des moyens à mettre en œuvre a permis d'emblée une approche fondamentale et intégrée, avec une rapide structuration de la communauté scientifique concernée autour de grands programmes internationaux, de grandes campagnes pluridisciplinaires (forages profonds, campagnes atmosphériques et océanographiques...), de grands équipements communs (bateaux océanographiques, radeau des cimes, avions, satellites...), de grands modèles (circulations atmosphériques, courants océaniques,...),

Aux échelles locales et régionales, le développement des recherches s'est surtout fait en réponse à une demande sociale croissante : la recherche de solutions immédiates aux problèmes pratiques d'environnement a davantage favorisé une approche empirique de l'environnement, une dispersion thé-

matique de la communauté scientifique, un endettement des moyens, ralentissant l'émergence d'une approche scientifique interdisciplinaire, l'élaboration de concepts et de théories adaptés. Ce n'est que récemment que des efforts de structuration de la recherche à ces échelles ont été faits (par ex. : Programme PIREN du CNRS en France; programmes STEP et EPOCH de la CCE). Ceci peut expliquer :

- une certaine dévalorisation des recherches menées à ces échelles, qui apparaissent en fait de plus en plus cruciales, et tout à fait complémentaires des recherches mieux soutenues et plus "médiatiques" menées aux échelles globales ou moléculaires;

- une mobilisation encore insuffisante de certaines disciplines, pourtant concernées directement par les problèmes d'environnement (chimie, sciences humaines et sociales, économie, histoire).

Ce nouveau champ de recherche souffre également d'une formation des scientifiques encore trop marquée par le découpage traditionnel en disciplines, dans un domaine où les problèmes sont le plus souvent interdisciplinaires par nature.

## **2 - MISE EN PERSPECTIVE SCIENTIFIQUE DU CHAMP :**

### **NIVEAUX D'ORGANISATION DU MONDE BIOLOGIQUE, ROLE DES FACTEURS DU MILIEU ET DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES**

Les niveaux d'organisation des composantes du monde biologique se situent à des échelles très différentes. Il s'agit : - des macromolécules organiques dont l'étude relève du domaine de la biochimie, - de la cellule (biologie cellulaire et moléculaire), - des organismes (relevant de la physiologie), - des populations (biologie des populations), - des peuplements, - des écosystèmes (écologie), - des paysages (écologie des paysages) et enfin de la biosphère.

Les pas de temps d'évolution de ces différentes unités varient de la fraction de seconde (réactions biochimiques) aux centaines ou aux milliers d'années (évolution d'un paysage ou du fonctionnement d'un écosystème à la suite d'une modification climatique d'ordre naturel).

En conditions naturelles et pour les niveaux d'organisation supérieure, la dynamique de chacune de ces unités dépend des flux d'énergie et de matière qui traversent le milieu et de l'efficacité des cycles biogéochimiques. La dynamique qui s'instal-

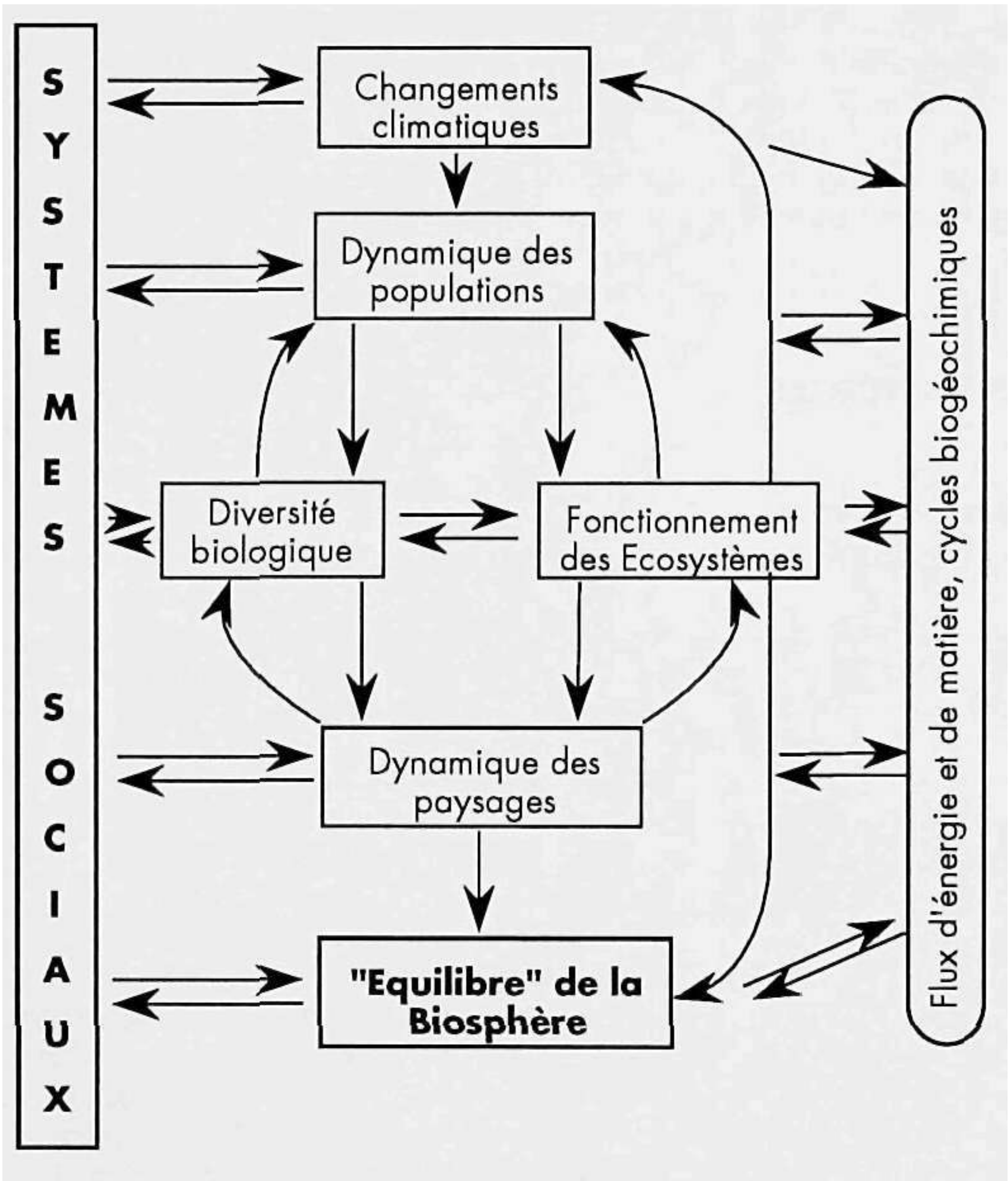
lera sera donc caractérisée par des processus démographiques (flux d'individus et d'espèces), biogéochimiques (flux d'énergie et de matière et cycles d'éléments) et bien évidemment, dans le cas d'interventions humaines, par des interactions à chacun de ces niveaux avec les systèmes sociaux correspondant à des modes de gestion et des perturbations diverses (cf. figure). On constate ainsi que les écosystèmes correspondent à un niveau d'organisation particulièrement intéressant pour la mise en évidence des flux de matière et d'énergie, mais aussi que les paramètres pris en compte dans l'étude des

populations ne sont généralement pas superposables à ceux pris en compte aux échelles de perception des écosystèmes.

Les recherches sur les passages d'une échelle spatiale ou temporelle à une autre sont probablement les plus riches de perspectives, car la dynamique des populations, les conditions physico-chimiques du milieu ainsi que d'éventuelles activités humaines s'exercent depuis l'échelle de la parcelle (lia) à l'échelle régionale ou continentale, et évoluent selon *des* pas de temps très différents, du jour à plusieurs centaines d'années.

### 3 - LES RENCONTRES POSSIBLES ENTRE DISCIPLINES

Le domaine des recherches sur l'environnement concerne un très large éventail de disciplines traditionnelles, appartenant à au



Situation des écosystèmes dans le niveau d'organisation du monde biologique et rôle des facteurs du milieu et des actions anthropiques sur le fonctionnement de ces écosystèmes (modifiée d'après BARBAULT et HOCHBERG, 1992).



moins six des Départements scientifiques du CNRS ; Sciences physiques et mathématiques (traitement de données), Sciences pour l'ingénieur (génie des procédés, modélisation, métrologie), Sciences de l'Univers (géosciences des environnements superficiels), Sciences chimiques (chimie, génie chimique), Sciences de la Vie (écologie, écotoxicologie, biologie, santé, ...), Sciences de l'Homme et de la Société (géographie, sociologie, économie, histoire, ethnologie, droit, ...). C'est cette grande diversité des disciplines, et donc des approches des mêmes problèmes, qui rend particulièrement difficile la nécessaire interdisciplinarité des recherches, faute d'un langage commun. Mais même si les sciences de la vie et les sciences de la terre doivent jouer un rôle moteur dans ces recherches, il est impératif de se garder de toute tentative d'appropriation du thème "environnement"<sup>11</sup> par une discipline ou un groupe de disciplines, et nécessaire que chacun garde la spécificité de ses approches.

## 4 - LES PROBLÉMATIQUES ACTUELLES

### Fonctionnement des systèmes écologiques et équilibre de la biosphère

#### *Diversité des milieux*

##### • *Milieux vecteurs*

*L'air*: milieu de vie et de propagation des ondes (bruits, lumière, ondes radioélectriques), l'air peut être un vecteur de dissémination et de redistribution, à l'échelle locale ou globale, d'organismes, d'énergie, d'eau et de matière. L'air est un agent géomorphogénétique et peut subir les effets de la pollution atmosphérique,

*L'eau* : milieu de vie d'un certain nombre d'écosystèmes et ressource pour les êtres vivants, l'eau est un vecteur de matières (en solution, en suspension ou en charriage) et d'organismes qui peuvent avoir des activités pathogènes, L'eau est

aussi un agent géomorphogénétique et peut être source de risques (crues, inondations, érosion, mouvement de masse). Il existe une forte interaction entre le cycle de l'eau, les cycles biogéochimiques et les cycles énergétiques (précipitations, évaporation). L'eau constitue une ressource globalement constante, mais localement plus ou moins renouvelable, à répartition spatiale et temporelle très inégale, et soumise par l'homme à usages multiples et souvent concurrents.

##### • *Milieux supports*

*Le sol*: milieu complexe, hétérogène, poreux, de nature organo-minérale, soumis à des flux d'eau, d'énergie et de matière, le sol est un réservoir d'organismes vivants. Il assure un rôle tampon et un rôle de filtre dans les cycles hydrobiogéochimiques. Il s'agit d'une ressource pour les écosystèmes et les agrosystèmes dont le taux de renouvellement est très lent et d'un milieu fragile, soumis à des dégradations quantitatives et qualitatives. Le sol est soumis à des risques (érosion, mouvements de masse).

##### • *Milieux bioclimatiques*

Les différents milieux bioclimatiques équatoriaux et tropicaux, humides, arides et semi-arides, tempérés, montagnards, polaires et subpolaires présentent des caractéristiques de pluviométrie et de température qui induisent des modes de fonctionnement différents et spécifiques pour les écosystèmes qui occupent ces milieux.

##### • *Ecotones*

Les écotones correspondent à des milieux de transition situés à l'interface des différents écosystèmes ou zones bioclimatiques; ils sont caractérisés par de forts gradients écologiques et des échanges plus ou moins importants entre les écosystèmes qu'ils séparent (contacts forêt-savane, contacts forêt-rivière, contacts zones saturées-zones désaturées, contacts océan-continent). Il s'agit de zones fragiles et sensibles qui constituent à l'échelle locale des systèmes clés pour l'étude des paysages.

## Spécificité des grands types d'écosystèmes

Les études actuelles portent sur de nombreux écosystèmes dont la liste qui suit n'est pas limitative.

### • En milieu continental

- les écosystèmes forestiers des grands biomes du globe :

. des milieux *tempérés* qui sont historiquement les plus étudiés, du fait des perturbations qu'ils subissent, pluies acides, gestion intensive et souvent monospécifique,

. des milieux *tropicaux* dont la productivité est liée à l'efficacité des cycles biogéochimiques et dont la surexploitation et la destruction posent de graves problèmes d'avenir,

. des milieux *méditerranéens* dont la dégradation par surexploitation, surpâturage et incendies provoque des phénomènes de mattoralisation, steppisation et désertisation,

. ou des *forêts boréales et de montagne* les plus sensibles aux variations thermiques globales;

- les agrosystèmes marqués par une gestion intensive, de forts apports de produits allochtones (engrais et substances xénobiotiques) et de fréquents changements de pratiques culturelles;

- les écosystèmes savane à peuplement surtout graminéen;

- les écosystèmes souterrains qui présentent des modes de fonctionnement très spécifiques;

- les écosystèmes dulçaquicoles (lacs, étangs, marais) à lent renouvellement des eaux ou des rivières et des fleuves;

- les écosystèmes insulaires,

### • En milieu marin

- les écosystèmes des lagunes côtières, des marais littoraux et des mangroves caractérisés par

une faible épaisseur d'eau et une faible homéostasie et qui présentent une très forte productivité;

- les écosystèmes littoraux, en particulier les écosystèmes récifaux et les écosystèmes à phanérogames marines, qui présentent une grande complexité de relations interspécifiques et une très forte productivité;

- les écosystèmes océaniques des domaines pélagique et benthique profond, ces derniers étant fortement dépendants d'autres écosystèmes pour leur approvisionnement en carbone organique;

- les écosystèmes océaniques profonds et abyssaux, particulièrement les sources hydrothermales et les zones de suintements froids dont le fonctionnement hétérotrophe est très original;

### • En milieu anthropisé

- les écosystèmes urbains fortement artificialisés et dont il sera question ultérieurement.

## Processus fonctionnels

Dépassant les approches sectorielles traditionnelles on peut noter actuellement une nette tendance à développer, sur des sites communs, des recherches pluridisciplinaires sur les écosystèmes. Ces recherches ont pour objectif une compréhension globale des processus dynamiques aux échelles locales et régionales et permettent de mieux comparer, valider et valoriser les résultats de chaque discipline,

### • [les processus de production de biomasse

Le rayonnement solaire capté par les végétaux est le facteur principal intervenant dans la production de biomasse végétale, et les études actuelles ont amené de nombreuses précisions sur la dynamique saisonnière de production de biomasse dans les écosystèmes grâce, en particulier, au suivi des variations de flux de sève dans les arbres. L'assimilation par les racines des éléments minéraux, étudiée par des traceurs stables ou radioactifs, met en relief l'importance de l'adéquation entre la disponi-

bilité d'un élément dans le sol à un moment donné et la demande racinaire à ce même moment. Le rôle des mycorhizes dans ces problèmes de nutrition - et donc de production - apparaît fondamental. En milieu marin, les mécanismes de la production, phyto-planctonique ont été précisés et fournissent des chiffres qui permettent d'affiner les bilans globaux de carbone.

- *ta décomposition et le recyclage des matières organiques*

La matière organique morte (litière foliaire et racinaire, nécromasse animale et microbienne) est soumise à des phénomènes de biodégradation et à des transformations qui libèrent des flux de matière dont l'importance et la répartition dans le temps sont fondamentales pour le fonctionnement des écosystèmes des milieux terrestres et aquatiques. Au niveau des sols, un certain nombre d'étapes-clés dans ces phénomènes de biodégradation et d'humification ont été définis, qui sont liés à la présence et à l'activité d'organismes spécifiques efficaces (vers de terre, termites, champignons, bactéries par exemple). L'absence de ces organismes, ou leur disparition liée aux variations des conditions du milieu, provoque des phénomènes de blocage et des accumulations de composés organiques peu transformés et peu réactifs. En revanche une biodégradation rapide de la matière organique aboutit à la production de nutriments utilisables directement, par la plante. Oui assurant une forte productivité) et de matière organique soluble qui peut se fixer pendant un temps plus ou moins long sur le complexe organo-minéral du sol et en modifier l'organisation (structure et porosité). Le sol est ainsi soumis à un flux de molécules organiques dont la nature et la diversité sont liées à la variété des organismes intervenant dans les phénomènes de biodégradation. En milieu limnique, les études récentes ont apporté des données nouvelles sur le recyclage des nutriments au niveau du plancton et de l'interface eau-sédiment. En milieu marin, l'étude des matières organiques dissoutes, et en particulier des flocons de matière organique amorphe, correspond à un aspect nouveau des transferts énergétiques au moins dans les zones littorales.

- *Les mécanismes de transfert et de transformation dans les milieux polyphasiques que sont les sols*

Les études portent sur : - l'estimation des flux d'eau, d'énergie et d'éléments biochimiques dans le système sol-végétation-atmosphère avec établissement de bilans correspondants; - les interactions eau-sol-roche-sédiment (altération et neutralisation) et processus aux interfaces; - les migrations verticales ou latérales, la fixation et le relargage de différents éléments métalliques ou organiques - et enfin sur les facteurs de résistance et de vulnérabilité des milieux (effet filtre et tampon du sol et des berges, importance des "charges critiques" en éléments et en polluants, flux de polluants).

## **Facteurs de perturbation du fonctionnement des écosystèmes à la suite d'interventions humaines**

### **Modalités**

- *Dans les pays développés*

On assiste à l'intensification de la production des surfaces cultivées sur des aires réduites s'accompagnant de l'abandon des terres et de déprise agricole. La gestion forestière est assez souvent de type uniforme (forêts monospécifiques et équiennes exploitées par à-coups) ce qui réduit la biodiversité des populations présentes. On assiste à une industrialisation croissante autour des villes et à une urbanisation forte avec aggravation des risques (inondations, séismes).

- *Dans les pays en voie de développement*

Du fait de l'accroissement de la population, des situations de pauvreté extrême, mais aussi d'insuffisance de "l'état de droit" ou des mécanismes économiques mal maîtrisés, on assiste à une augmentation des surfaces cultivées et à une intensification des cultures, à une déforestation croissante et à une fragmentation du paysage aboutissant souvent à une désertification par surexploitation et à une urbanisation de plus en plus intense.



## Conséquences

### • Dans les écosystèmes terrestres

Dans tous les cas - et surtout dans les écosystèmes fragilisés ou situés en conditions limites -, on assiste à une dégradation des écosystèmes, à la perte des diversités génétiques, spécifiques et fonctionnelles et à la remise en cause des équilibres antérieurs à la suite de l'introduction d'espèces nouvelles exotiques ou transgéniques qui aboutissent à des phénomènes d'invasion, de pullulation ou de disparition. Les sols subissent des dégradations diverses (pertes de matière organique, dégradation des structures, érosion, salinisation, etc.). Les formations végétales peuvent être le siège d'altérations diverses ("pluies acides" sur forêts). On assiste aussi à une accumulation des déchets chimiques et radioactifs, au stockage de produits dangereux (industriels ou militaires) pouvant engendrer des catastrophes ou une pollution diffuse, et à la dissémination des micropolluants.

### • Dans les écosystèmes dulçaquicoles

On assiste à la surexploitation continue en quantité et à la diminution de la qualité des eaux continentales de surface et des eaux souterraines et des sols par contaminations diverses (et en particulier par la présence de substances xénobiotiques).

### • Dans les écosystèmes marins

On assiste à une surexploitation des ressources vivantes, à une pollution diffuse, (surtout des écosystèmes littoraux qui sont des lieux privilégiés d'andropisation pour des usages portuaires, touristiques, aquacoles, urbains et où débouchent toutes les pollutions des bassins versants continentaux), et aussi à des pollutions catastrophiques (types Torrey Canyon ou Amoco Cadiz) et à l'introduction d'espèces exotiques. Or la plupart de ces impacts se concentrent dans la zone littorale, qui, malgré son étroitesse (0,1 % de la surface des océans), représente 10 % de la productivité des océans.

### • Enfin dans les écosystèmes urbains

On constate l'existence de pollutions atmosphériques graves, de pollutions par le bruit aux effets physiologiques et psychologiques néfastes, sans parler des problèmes de santé (épidémies) et des nombreux problèmes sociaux spécifiques,

## La diversité biologique

La diversité biologique représente une des richesses de la biosphère et une richesse pour les écosystèmes. Elle constitue une ressource naturelle exploitable par l'homme (amélioration des espèces, propriétés spécifiques chimiques, alimentaires ou médicales). Elle représente :

- un objet d'étude en soi au niveau de la diversité génétique (connaissance des génomes et de leur organisation, connaissance des mécanismes de réplication, de réparation, processus de transfert), de la diversité spécifique (flux génique et vitesse d'évolution, spéciation, biologie des extinctions) et de la diversité fonctionnelle (dynamique des populations, compétition inter et intraspécifique, prédation, parasitisme, coopération, comportement face à différents types de pressions écologiques, etc.);

- un élément clé des équilibres biologiques et du fonctionnement des écosystèmes (production, biodégradation et recyclage, interactions entre organismes à tous les niveaux d'intégration, interactions organismes-milieu dans le cas par exemple de l'altération biologique des minéraux).

Cette diversité doit être bien connue pour être protégée. En effet, la diminution de la biodiversité liée aux activités humaines se manifeste au niveau des populations, des communautés et du fonctionnement des écosystèmes. Elle aboutit à une uniformisation des populations liée à la disparition des espèces par mortalité à la suite de l'introduction de produits xénobiotiques, par exemple, ou à l'apparition de phénomènes d'exclusion compétitive entre espèces. Elle peut aboutir aussi à des modifications importantes et quelquefois définitives des commu-

nautés en place dans les systèmes insulaires antarctiques et les communautés benthiques littorales, par exemple, par introduction d'espèces nouvelles issues d'autres continents, d'autres océans ou d'autres latitudes, à la suite du développement de l'agriculture, de la production forestière, de l'aquaculture et de l'augmentation des échanges commerciaux, touristiques, etc

## 5 - LES THÈMES EN ÉMERGENCE

### **Approche intégrée du fonctionnement des écosystèmes et des paysages**

Le concept d'écosystème, créé initialement sur des principes thermodynamiques, a pris une dimension particulière en référence aux lois sur la dynamique des systèmes. Il existe un gradient de définition des écosystèmes, depuis les plus classiques (forestiers, océaniques, steppiques par exemple) jusqu'aux systèmes biologiques interactifs tels que les écosystèmes microbiens, planctoniques, parasitaires. Les écosystèmes forestiers font intervenir différents niveaux de production et de décomposition évalués par des flux de matière et d'énergie, alors que les écosystèmes biologiques interactifs sont caractérisés par leurs interrelations complexes comme, par exemple, les relations prédateurs-proies, hôtes-parasites ou les interactions compétitives, qui diffèrent les uns des autres par leur degré de stabilité et, en conséquence, par leur valeur sélective. De ces connaissances émergent peu à peu les concepts de "ressources clés de voûte" et d'espèces "clés de voûte" (*key stones resources and species*). Les écosystèmes semblent correspondre, comme il a déjà été dit, au niveau d'organisation biologique le plus adéquat pour étudier ces systèmes, mais à la dimension énergétique du fonctionnement de l'écosystème doit être intégrée une dimension évolutive. Les écosystèmes sont à la fois caractérisés par leur complexité, leur structure biologique, l'intensité des flux de matière et d'énergie, les échanges latéraux, mais aussi par leurs

composantes temporelles qui reposent sur des phénomènes biologiques, physiques, chimiques et climatiques. C'est ainsi que, dans un même écosystème forestier, le temps de multiplication des micro-organismes du sol est très court, celui des plantes annuelles long, et celui des arbres forestiers très long; quant aux changements climatiques globaux qui ont varié d'une façon très lente aux cours des temps géologiques et des périodes historiques, leurs variations s'accroissent brusquement à la suite des perturbations liées aux activités humaines. Toutes ces composantes spatio-temporelles interagissent au sein des écosystèmes qui nous entourent et créent une hétérogénéité spatiale et temporelle qui ne peut être étudiée que par une approche couplée des phénomènes physiques, chimiques et biologiques intervenant dans le fonctionnement des écosystèmes.

L'impact grandissant de l'action de l'homme sur les milieux, les populations, les communautés fait apparaître de manière de plus en plus nette la nécessité de distinguer les écosystèmes "naturels" relativement peu perturbés, les écosystèmes artificialisés, comme, par exemple, les écosystèmes urbains, et les interfaces entre écosystèmes : écosystèmes forestiers-agrosystèmes, écosystèmes terrestres et lagunaires, etc. De nombreux thèmes de recherche reposent sur la définition d'interactions nouvelles permettant de caractériser ces écotones ou des systèmes complexes se situant au niveau du paysage (écologie du paysage) et des systèmes artificialisés. Le passage des études concernant les écosystèmes "naturels" à celles concernant les écosystèmes artificialisés permet de proposer aujourd'hui des solutions d'écotechnologie ou d'écologie opérationnelle.

L'intégration, dans le concept d'écosystème, de processus interactifs mesurables à l'échelle de l'individu, de la population, de la communauté, ou à l'échelle des interfaces entre écosystèmes, ou à l'échelle de systèmes complexes, suppose l'utilisation de l'informatique (système d'information géographique, systèmes de gestion de bases de données et modèles) et de la modélisation intégrée. Ces outils sont indispensables pour traiter les problèmes

de changements d'échelle dans les milieux (approche fractale de l'hétérogénéité spatiale, relations entre échelles de perception, organisation spatiale et fonctionnement des milieux), dans les systèmes hiérarchisés (du gène à l'écosystème) et dans les systèmes emboîtés (par exemple emboîtement des différents cycles biogéochimiques des écosystèmes, emboîtement des différents niveaux structuraux dans le sol et le paysage).

### **Approches sociologique et historique des perturbations amenées par les activités humaines vis-à-vis du fonctionnement des écosystèmes**

Ces deux types d'approches sont importants et permettent d'avoir une idée de la réversibilité ou de l'irréversibilité de certaines perturbations anthropiques sur le fonctionnement des écosystèmes. Les interactions multiples que les groupes humains et, en particulier, les sociétés traditionnelles entretiennent avec les écosystèmes dans lesquels ils vivent sont importantes à connaître. Chaque société élabore des connaissances et des pratiques techniques et aussi symboliques par lesquelles elles exploitent ces écosystèmes pour se perpétuer. La diversité des modes d'interactions entre écosystèmes et sociétés doit être analysée. L'exploitation et la gestion des écosystèmes, les solutions techniques et les pratiques sociales, la manière dont les sociétés traditionnelles savent gérer les "pointes", les soudures et les périodes exceptionnelles représentent un sujet d'étude capital qui permet de voir les limites de perturbations anthropiques non destructrices. Ces connaissances représentent une véritable ressource.

Il en est de même des relations homme-nature à l'holocène et de toutes les études de paléoclimatologie, palynologie, glaciologie et dendroécologie faites sur les périodes historiques et préhistoriques. Ces études permettent d'avoir des indications sur les paléoenvironnements de l'homme à différentes échelles de temps et sur les conséquences de certaines actions anthropiques provoquant soit des changements durables, soit de simples crises éphémères avec des durées d'amor-

tissement variables en fonction de la stabilité des milieux. Ces études paléoécologiques pluridisciplinaires portant sur des périodes récentes apportent beaucoup à la connaissance du fonctionnement d'un grand nombre d'écosystèmes actuels.

### **Physiologie environnementale et écoéthologie**

L'étude de la diversité des organismes (des systèmes génétiques aux grands ensembles faunistiques et floristiques) et de la régulation de cette diversité dans les écosystèmes naturels ou altérés constitue un thème de recherche important. L'intérêt des recherches en biogéographie historique et en biosystématique est évident, mais l'approche de type explicatif concernant le fonctionnement de système "population-environnement" modèle ou de référence dans le cadre des recherches sur les stratégies adaptatives est prometteuse. Les études des mécanismes de coévolution ont transformé beaucoup de nos idées théoriques sur les pressions de sélection induites entre espèces.

La physiologie environnementale se préoccupe des contraintes exercées par le milieu sur les organismes et des réponses régulatrices ou adaptatives qu'elles suscitent. Les populations animales et végétales ont colonisé des milieux très divers - dont les milieux aquatiques -, et l'on apprécie de façon encore très insuffisante l'impact de ces environnements sur les espèces qu'ils hébergent. Qu'elle soit naturelle ou artificielle, la contrainte environnementale peut, dans certains cas, être seulement subie ou ne susciter qu'une réponse protectrice comme la fuite, la migration ou l'hibernation; mais le plus souvent l'organisme tend à corriger l'effet de la contrainte par une réponse homéostatique immédiate ou à plus long terme. Dans tous les cas, il y a un prix à payer, soit par l'accroissement du flux de matière et d'énergie, soit par les effets indirects du "stress". La respiration aquatique des animaux, par exemple, impose la circulation d'un débit important d'eau sur une surface perméable, la branchie; de ce fait, l'animal est mal protégé des variations de composition du milieu, qu'elles affectent



les constituants naturels comme l'oxygène ou les ions minéraux ou résultent de pollutions. D'autre part, pour les organismes, le milieu représente l'origine et la destination finale de tous les échanges de matière et d'énergie. La dépense d'énergie joue un rôle déterminant dans la dynamique des populations : ainsi le maximum saisonnier de dépense énergétique lié à la croissance des jeunes conditionne les possibilités d'augmentation des effectifs. De même, la valeur du minimum incompressible de la dépense d'énergie ainsi que les capacités de stockage et d'utilisation de réserves limitent la survie en période de disette.

Ce domaine est en voie d'être transformé par les technologies nouvelles (capteurs et systèmes d'acquisitions de données portés par l'animal) qui permettent maintenant de suivre des variables physiologiques ou des variables du milieu au contact d'un animal en liberté dans son milieu. Une importante application est en vue : l'utilisation d'oiseaux aquatiques (manchots) comme bio-indicateurs permettant le suivi des ressources marines (poissons, céphalopodes) et l'évaluation de l'impact des pêches.

L'écoéthologie permet de connaître les réponses des organismes aux conditions habituelles de leur environnement ou à leurs perturbations. Les interactions animales par exemple au sein des écosystèmes résultent de comportements individuels qui permettent aux organismes d'assurer leur autoconservation et leur reproduction. La survie nécessite l'exploitation de ressources (flux d'énergie et de matières), ce qui implique la prise en compte de l'ensemble des mécanismes permettant à l'animal de se positionner par rapport à ses ressources indispensables (utilisation de l'espace, relations prédatrices-antiprédatrices, coopérations, compétitions intra ou interspécifiques). L'intégration de l'animal dans son environnement doit être vue comme une réponse active résultant de prises d'informations multiples et de leurs traitements liés à des capacités sensorielles, intégratives, mnésiques et motrices. Il en va de même des phénomènes de reproduction qui, dans le cadre des écosystèmes, permettent la dynamique du renouvellement des générations (flux génique).

Un bon exemple d'application de ces approches est illustré par les résultats obtenus dans le cadre des études faites sur l'incidence d'une augmentation de la teneur en  $CO_2$  atmosphérique sur le fonctionnement des écosystèmes :

- effets sur la production de biomasse et réaction des plantes (compétition entre espèces végétales, compétition entre plantes en C3 dont la production globale semble favorisée par rapport aux plantes en C4 lorsque la teneur en  $CO_2$  augmente),

- effets sur la faune et sur la microflore, en particulier sur la dynamique des espèces (conséquences sur la décomposition et le stock de matière organique du sol),

- effets à l'échelle de l'écosystème sur les bilans de carbone et d'azote et les cycles biogéochimiques.

Il en est de même des résultats portant sur les effets d'une élévation de température et d'une modification du régime hydrique ; le fonctionnement des écosystèmes, la composition des communautés animales et végétales sont modifiés, la biodiversité est perturbée, et les équilibres physiques, chimiques et biologiques du milieu, liés souvent à des "effets de seuils", peuvent être profondément transformés.

## Ecotoxicologie et radioécologie

L'introduction par l'homme de substances xénobiotiques et radioactives dans les écosystèmes a des conséquences importantes sur les équilibres physico-chimiques et biologiques existant dans ces systèmes écologiques. La radioécologie étudie le transfert dans les chaînes trophiques des éléments radioactifs dûs aux activités humaines (explosions nucléaires, produits de fission des réacteurs nucléaires). À cause de leur longue durée de vie, certains produits de fission comme le  $^{137}Cs$  et  $^{90}Sr$  ainsi que certains éléments transuraniens se sont accumulés par concentration biologique dans des compartiments bien définis de la biosphère. Ces

produits radioactifs peuvent, de ce fait, constituer d'excellents traceurs de concentration biologique ou révélateurs, par leur spéciation, de conditions particulières du milieu. La radioécologie pose le problème de la fiabilité Technologique du stockage ou de l'élimination des déchets irradiés provenant des combustibles radioactifs ou des matériaux contaminés : stockages en sites profonds, vinification, retraitement, etc.

Les recherches en écotoxicologie portent sur le devenir des toxiques organiques et métalliques dans l'environnement et sur leur impact vis-à-vis des organismes, des populations et des écosystèmes. Jusqu'à maintenant les études faites en écotoxicologie ont été surtout consacrées à répertorier les toxiques environnementaux et à mieux connaître leurs structures moléculaires, à décrire leurs transferts dans les sols et dans les eaux, et à évaluer leurs effets sur les écosystèmes.

Les premiers problèmes auxquels se heurtent, les spécialistes de l'écotoxicologie sont des problèmes analytiques de séparation, de détection et de quantification de traces et d'ultra-traces des produits xénobiotiques. Pour répondre à cette demande spécifique, les chimistes analystes proposent l'utilisation de techniques modernes : chromatographie liquide haute pression, chromatographie en phase supercritique, électrophorèse capillaire, différentes méthodes nucléaires, spectrométrie de masse par modes d'ionisation divers, torche à plasma couplée à la spectrométrie de masse par exemple, analyses de surfaces, SIMS décapage ionique, photoémission, infra-rouges à transformée de Fourier, absorption X, techniques directement liées à la mesure de la pollution effective des surfaces. Ce potentiel analytique permettra d'établir des normes de pollution dont le contrôle sera assuré par des capteurs spécifiques, et notamment des biocapteurs.

Ces produits xénobiotiques peuvent apparaître dans les milieux naturels sous des formes diverses (spéciations à étudier) présentant des toxicités variées. Selon leur affinité, certains de ces composés peuvent être masqués par adsorption sur des ma-

tières minérales, ou associés à des macromolécules organiques présentes dans les eaux, les sols ou les sédiments, et être éventuellement relargués par la suite. Dans les milieux naturels, ces produits peuvent subir des transformations diverses, biodégradation, transformations abiotiques donnant naissance à des produits nouveaux qui peuvent se révéler plus nocifs que les produits initiaux et qu'il est important de caractériser. Enfin ces produits micropolluants peuvent subir des transferts dans les eaux naturelles et passer d'un compartiment à l'autre (eau-atmosphère-sol-sédiment), subir des phénomènes de bioconcentration et contaminer les écosystèmes. Le suivi de ces transferts fait appel à de nombreux domaines de la chimie fondamentale, tels que caractérisation fine de la matière organique présente dans les eaux, chimie des solutions très diluées, chimie et catalyse en milieu hétérogène, chimie radicalaire, physico-chimie des mécanismes de complexation, d'interaction et d'oxydo-réduction, ainsi qu'à des notions plus globales en hydrogéologie, en pédologie et en mécanique des sols.

Quant à l'effet des micropolluants sur les organismes, il apparaît aujourd'hui urgent :

- de comprendre en termes moléculaires les processus qui sous-tendent la réponse des êtres vivants aux contraintes chimiques de l'environnement tels que inductions d'enzymes, biotransformation des polluants, bioconcentration, genèse des résidus, modifications de l'ADN,

- de détecter précocement l'impact de ces molécules sur les organismes,

- de modéliser, sur la base des résultats obtenus à partir du court terme, les conséquences à long terme.

Une série d'avancées récentes dans les domaines de la biologie et de la biochimie permettent d'aborder ces problèmes aux niveaux subcellulaire et moléculaire. En particulier, la perception de l'environnement chimique (récepteurs, enzymes), la transduction des signaux (messagers, hormones,

dépolarisation, flux d'électrons) et leur expression (induction/répression d'enzymes, modulation d'activité ou d'état des membranes) doivent être identifiées. Les systèmes d'enzymes qui forment l'interface entre la plupart des êtres vivants et leur environnement chimique ont un rôle établi dans les phénomènes d'activation /détoxification des xénobiotiques ainsi que dans la formation des résidus toxiques. Leur utilisation comme marqueurs biologiques de pollutions se développe, et la mise au point de "kits" d'anticorps et de sondes nucléotidiques sélectives qui permettront la détection précoce des pollutions par leurs effets biologiques intégrés, est à encourager.

Bien entendu, toute recherche écotoxicologique implique la référence aux conditions normales. Le facteur limitant se situe très souvent dans notre connaissance insuffisante de la physiologie environnementale de l'animal placé dans un milieu équivalent en l'absence du toxique. Ceci est particulièrement vrai des animaux aquatiques et des interactions possibles du toxique avec les facteurs de stress physiologiques (effort locomoteur, reproduction).

L'origine de la génotoxicité de certains polluants, notamment les mécanismes de formation des adduits d'ADN connus chez les animaux et récemment décrits chez les plantes, devrait être étudiée. Enfin les capacités de dépollution offertes par certains organismes, notamment les bactéries et les champignons du sol et des eaux, devraient être systématiquement explorées, et il est urgent de chercher à optimiser leurs performances par les techniques de recombinaison génétique.

## Ecologie des milieux urbains

Il est évident que, parmi les problèmes urgents qui se posent à la recherche, la question de la dégradation de l'environnement urbain (et des moyens de faire un état des lieux, d'évaluer les risques, de les prévenir, d'améliorer la qualité de la vie, etc.) est une des questions de première priorité, dans la mesure où elle concerne une part crois-

sante de la population vivant dans des villes géantes en pays dits développés comme en pays en voie de développement. C'est la raison pour laquelle on voit de plus en plus émerger des problématiques de recherche portant sur la gestion de l'environnement urbain" et qui touchent plusieurs disciplines. En géographie, cet objectif passe par une nécessaire territorialisation de l'environnement : le territoire urbain doit être appréhendé comme un système où se nouent des relations entre les faits naturels et les faits sociaux en retrouvant une interdisciplinarité interne à la discipline et ouverte aux autres disciplines. La géographie urbaine est encore essentiellement une géographie sociale ou spatiale. Mais la climatologie urbaine, la dynamique des paysages urbains, la perception de la qualité de l'environnement, représentations, pratiques et usages de l'environnement commencent à être étudiés à l'échelle des quartiers. En écologie émergent également des problématiques liées à l'environnement urbain. "l'écologie des milieux urbains" prend une place dans cette discipline portant sur la circulation des flux de matière et d'énergie dans les villes, sur l'étude de certaines populations animales et de leur dynamique dans les immeubles urbains ainsi que sur l'écologie des "espaces verts" et de la végétation en ville. Avec ces approches, on se dirige vers l'élaboration du concept d'"écosystèmes urbains" et vers des tentatives de compréhension des mécanismes qui font évoluer ce que l'on a encore du mal à identifier comme des "écosystèmes" dans lesquels les rapports homme/nature, les risques de pollution et de santé, etc., ont leurs spécificités.

## Estimation et prévention des risques naturels et technologiques

Il est nécessaire de distinguer deux notions dans le cas des risques naturels : l'aléa qui traduit la probabilité d'occurrence d'un événement donné et le risque qui traduit les conséquences écosystémiques, économiques et sociales de cet aléa. Les aléas naturels sont divers : les uns sont liés à des mouvements gravitaires lents ou rapides (glissements de terrain, par exemple), d'autres à des phénomènes liés à l'eau (inondations, crues torren-



tielles), à la neige ou à la glace, d'autres aux séismes naturels ou induits, aux éruptions volcaniques, aux phénomènes atmosphériques (tempêtes, cyclones, sécheresses). Les recherches scientifiques concernant les risques portent sur : - l'occurrence de l'événement (mécanisme de la genèse, événements précurseurs, évaluation des périodes de retour); - la vulnérabilité des milieux concernés; - la phénoménologie de l'événement une fois déclenché, dont la durée peut être de quelques secondes à plusieurs années; - les effets sur le système dans lesquels ils se produisent.

Les risques d'origine naturelle sont de plus en plus importants du fait des concentrations urbaines, de l'existence de grosses infrastructures industrielles (dont les usines nucléaires) et du développement de réseaux de toute sorte. Mais si on ne peut rien faire - ou presque - pour réduire les aléas naturels, la maîtrise des risques naturels représente un enjeu majeur auquel on peut s'attaquer avec les connaissances actuelles et qui ne peut se réaliser que par une approche interdisciplinaire. L'estimation quantitative des aléas (par exemple leur prévision temporelle) passe par une activité importante d'observations et de surveillance. D'autre part, si l'étude des paléoévénements peut permettre une meilleure appréciation de la fréquence de ces événements redoutés, l'estimation de la vulnérabilité des systèmes complexes (tels que ceux existant dans les mégapoles) à des événements comme les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes, les inondations, devient obligatoire. Il faut aussi tenir compte du fait que certains aléas peuvent être reliés à l'activité humaine (imperméabilisation des surfaces, modifications des états de contraintes crustaux sous l'effet d'une accumulation d'eau par barrage ou d'une surexploitation par pompage) et en définir l'impact.

Les risques engendrés par les activités humaines sont peu liés à des aléas naturels. Ils peuvent être définis par des études d'impacts écologiques qui consistent à évaluer les retombées prévisibles d'un projet-sur l'environnement (pollutions, bruit, destruction de milieux naturels, disparition de ressources naturelles), mais ceci à condi-

tion d'en connaître toutes les conséquences sur les systèmes écologiques aux interactions multiples et "insidieuses" (comment, par exemple, estimer les conséquences de l'introduction d'organismes génétiquement modifiés ou de molécules nouvelles dans un écosystème ?).

## Droit et environnement

Malgré les politiques d'environnement et les progrès de la science depuis vingt ans, on assiste à une accumulation - et parfois à une aggravation - des menaces irréversibles sur les milieux, les ressources et les écosystèmes. Les menaces sont parfois ponctuelles (pollutions accidentelles, catastrophes écologiques) ou le plus souvent diffuses dans l'espace et dans le temps (pollution des sols, pollutions radioactives). Du fait de l'apparition de problèmes d'environnement à l'échelle globale et non plus seulement locale (pluies acides, nuages radioactifs, perturbations de la couche d'ozone, érosion des ressources génétiques), les réponses scientifiques et sociales ont tendance à devenir de plus en plus collectives. Le rôle des états, des organisations internationales et régionales qui développent tous des programmes "environnement", des groupes de pression et des parus conduit la recherche à se centrer sur l'étude des formes de l'action normative et réglementaire et à imaginer des instruments garantissant le respect du droit de l'environnement. Ce droit de l'environnement est en fait constitué des modalités juridiques du droit à la participation et à l'information; il suppose en fait la reconnaissance du droit de l'homme à un environnement viable et de qualité.

Par ailleurs des recherches doivent être entreprises sur les modes de décision à même de mieux maîtriser le passage entre science, expertise et décision et les conditions d'un débat public. Ceci passe par l'approfondissement de quelques principes :

- le principe de communication préalable (procédure de consultation préalable du public sur les textes réglementaires nouveaux),

- le principe de précaution (rapport science et droit Face à l'incertitude et à l'ignorance),

- et le principe de proximité (gestion et élimination des déchets dangereux le plus près de leur lieu de production).

De nouveaux concepts juridiques concernent Ses liens entre personnes humaines et "choses" ; intégration de l'environnement dans les concepts de propriété et de souveraineté. Un statut juridique devra être trouvé pour les éléments essentiels de l'environnement : écosystèmes, paysage, bassin versant, plaine alluviale, etc Un. droit de la responsabilité objective doit être établi et un nouvel ordre juridique international reconnu. De nouvelles solidarités nationales et internationales doivent être acceptées, et une nouvelle coopération internationale scientifique et juridique doit être instituée (droit d'ingérence écologique, désarmement, décontamination des armes chimiques et toxiques, lutte contre les risques majeurs, etc.).

## **Economie, institutions et environnement**

Contrairement à la situation des années 60-70, les problèmes d'environnement deviennent de plus en plus une composante des stratégies économiques et technologiques, voire des enjeux de négociations internationales, et présentent un certain nombre de caractéristiques communes :

- les nuisances ne sont généralement pas perçues directement, mais à travers un processus de médiatisation de l'information impliquant scientifiques, politiques et mouvements sociaux;

- il existe très souvent un décalage temporel et spatial important entre causes et effets;

- en raison de la double inertie des phénomènes naturels eux-mêmes et de l'adaptation des systèmes techniques, économiques et sociaux, il est nécessaire de prendre des décisions collectives malgré la persistance de controverses

scientifiques sur les processus et les risques encourus;

- enfin il y a une internationalisation de la plupart des débats parce que certaines dégradations sont transfrontières ou parce que l'internationalisation des systèmes productifs conduit à rechercher une harmonisation des normes et des règles.

Donc incertitudes et controverses caractérisent la plupart des questions de gestion collective des risques. Sur ces problèmes, trois grands axes nouveaux sont abordés :

- étude des critères et procédures de décisions collectives et étude des institutions à même d'inciter les acteurs économiques et sociaux à tenir compte des risques d'environnement, articulation entre lois, règles, normes et systèmes d'incitation fondés sur les outils du marché;

- étude des déterminants socio-économiques de l'évolution des technologies, des modes de consommation et de l'aménagement spatial, facteurs qui sont à l'interface des relations entre l'homme et son environnement naturel frôle des prix, des règles et normes et des institutions); le contrôle scientifique des données et modèles suppose l'élaboration d'outils permettant de tester les cohérences entre hypothèses technologiques, régulations économiques et acquis scientifique sur les processus naturels à l'échelle du moyen terme; enfin à l'échelle du long terme, l'articulation avec l'évolution démographique est incontournable;

- étude de la formation des perceptions collectives et du rôle de la médiatisation de la science dans ces perceptions (mouvements sociaux et d'opinion, lien science-expertise-décision qui doit être étudié simultanément par les sciences de la nature et les sciences économiques et sociales).

## **Environnement et modélisation**

Le modèle intervient à plusieurs niveaux dans la pratique scientifique : comme paradigme, comme

moyen de représentation des connaissances, comme descripteur d'un ensemble de données, comme outil de génération de données (par exemple en transformant les données brutes obtenues sur un capteur en données utilisables). Au sein des sciences du vivant, l'écologie est une très forte consommatrice de modèles (des modèles théoriques de l'écologie "mathématique" aux modèles généraux d'analyse des données). Là où l'expérience est coûteuse et difficile, l'effort de modélisation est indispensable, dans le cadre évidemment de la dialectique modèle-expérience.

### **Quel est l'état de l'art ?**

Si l'analyse de compartiments est encore utilisée et utile, en revanche les efforts actuels portent sur l'analyse spatio-temporelle et sa modélisation. On retiendra en particulier les relations structure-fonctionnement ; la structure spatiale est la résultante de processus sous-jacents, mais, inversement, cette structure influe sur le dénombrement des processus. Par exemple : le couvert végétal dépend du climat; inversement, les modifications du couvert végétal peuvent influencer le climat local ou régional et, de là, agir sur la croissance des végétaux et donc sur la structure du couvert lui-même... Ainsi peuvent se trouver amplifiées des perturbations qui semblent minimales au départ. Les conséquences peuvent encore être augmentées si les relations sont "non linéaires" (ou à "effet de seuil"). Ainsi, et pour s'en tenir à la modélisation "cognitive" (c'est-à-dire celle qui intègre les connaissances sur les processus), "spatio-temporel" et "non linéaire" sont deux mots-clés dont on comprend aussitôt l'intérêt pour des spécialités nouvelles comme l'écologie des paysages, la biologie des populations morcelées, ou pour l'étude du transfert et des transformations d'énergie et de matière.

### **Quels sont les outils ?**

En fait, à peu près tous les outils mathématiques probabilistes, statistiques et informatiques et pour les aspects spatio-temporels, les équations aux dérivées partielles et les automates cellulaires. Ces derniers sont d'une mise en œuvre simple; specta-

culaires dans leurs résultats, ils devraient séduire une large communauté de biologistes et d'écologistes. On notera que ces outils, notamment les équations aux dérivées partielles, peuvent permettre de représenter d'une part la dynamique des populations structurées (structure spatiale, mais aussi structure en âge, en génotype...) et d'autre part la dynamique propre du milieu lui-même (par exemple les courants dans un milieu aquatique). Ces outils permettent de calibrer, valider les simulations et estimer l'incertitude sur les relations, les variables et les paramètres du modèle, à condition qu'il y ait un dialogue actif constant entre acquisition des données et modélisation,

Le recours au modèle est un facteur positif dans toute tentative de recherches interdisciplinaires : le modèle est un médiateur du discours disciplinaire dans un contexte interdisciplinaire. De plus, participer à l'élaboration d'un modèle "commun" d'un même objet, d'un même problème, (outre son intérêt propre en tant qu'outil), est un facteur centrifuge important. Par exemple, on peut souhaiter que des hydrologues biologistes et écologistes soient associés très tôt dans la construction des "modèles communautaires" de la dynamique du climat intégrant l'influence des systèmes vivants et de leurs conséquences au niveau de l'évolution des écosystèmes.

## **LA SITUATION**

### **1 - LA SITUATION DE LA RECHERCHE FRANÇAISE EN EUROPE ET DANS LE MONDE (FORCES ET FAIBLESSES)**

Par rapport à la recherche anglo-saxonne et Scandinave, très dynamique dans le domaine de l'environnement depuis une vingtaine d'années, et souvent bien structurée autour d'organismes importants assurant la liaison entre recherches fonda-



mentale et appliquée, la recherche française souffre encore d'un cloisonnement hérité du passé entre les disciplines et d'un éclatement du thème entre les divers organismes concernés (BRGM, CEA, CEMAGREF, Agences de l'eau, CIRAD, CNRS, EDF, IFP, IFREMER, INRA, INSERM, Météo France, MNHN, ORSTOM, Universités, ...) et leurs Ministères de rattachement (Recherche, Education nationale, Agriculture, Mer, Industrie, ...). La richesse des approches et des points de vue (différents selon les organismes) est encore mal valorisée, faute de concertations suffisantes et de grands programmes inter-organismes. Il existe des coupures artificielles, comme par exemple entre les parties aériennes (Météo France), superficielles (CEMAGREF) et souterraines (BRGM) du cycle de l'eau. La séparation est trop marquée entre recherches fondamentales et appliquées. Les financements sont trop faibles et proviennent de contrats d'étude trop dispersifs pour permettre un développement équilibré de la recherche fondamentale.

La plupart de ces organismes recrutent surtout dans des écoles d'ingénieurs, où la formation en environnement est encore embryonnaire, et où renseignement, encore trop théorique, ne développe pas assez le sens du terrain et de la complexité des phénomènes naturels. Quant à la formation universitaire en ce domaine, elle ne s'est pas encore structurée en véritables Départements des Sciences de l'Environnement largement inter-disciplinaires au sein des universités - comme c'est le cas par exemple aux Etats-Unis ou en Grande-Bretagne -, même si on assiste à une floraison de filières de deuxième et troisième cycles en environnement (DEA, DESS, DEUS).

Depuis 1990, de nombreuses initiatives (Colloque "Planète Terre" de Strasbourg, Journées "Recherches et Environnement" de Strasbourg en 1990 et de Saint-Malo en 1991, Rapport à l'Académie des Sciences sur les "Eaux souterraines"...) ont marqué la prise de conscience de l'importance et de l'urgence des études écosystémiques et environnementales par la communauté scientifique française, qui se manifeste également par les réponses croissantes et de mieux en mieux coordonnées des

équipes françaises aux appels d'offres nationaux ou européens (STEP par exemple) ou la participation à de grands programmes mondiaux.

On peut ainsi identifier un potentiel relativement important de recherches dans les différents organismes. C'est ce potentiel que s'attachent à mieux valoriser et mobiliser les tentatives en cours pour structurer, avec bien des difficultés et des lenteurs, la recherche en ce domaine (Programme Environnement du CNRS; projets de GIP "Connaissance et gestion des hydrosystèmes"<sup>11</sup> et "Fonctionnement des écosystèmes forestiers", ...).

La communauté scientifique française concernée par les problèmes d'environnement est encore numériquement faible dans certains domaines, particulièrement en écologie quantitative et en hydrologie. Mais l'originalité des approches et la qualité de l'école française s'affirment nettement depuis quelques années : son audience internationale est aujourd'hui incontestable.

Si le champ de l'environnement semble globalement assez couvert en France, il existe encore des faiblesses dans certaines disciplines insuffisamment mobilisées (génie des procédés, chimie, sciences sociales et humaines,...) ou fragilisées dans un passé récent (écologie, hydrologie, systématique,...), ou encore en émergence (écotoxicologie, microbiologie, écologie urbaine,...),

Par rapport aux pays anglo-saxons et Scandinaves, où certains sites sont suivis depuis cinquante ans, la France souffre également d'un déficit important - et de plus en plus souvent souligné - en dispositifs de terrain pour des recherches intégrées à long terme (stations écologiques expérimentales, bassins versants de recherche emboîtés, versants instables bien instrumentés, ...) Et pourtant, par la variété des milieux représentés tant en métropole qu'outre-mer (Guyane, Polynésie), la France dispose d'atouts considérables pour développer dans le contexte scientifique européen de tels dispositifs, très utiles par leur quadruple fonction de laboratoire de terrain, d'observatoire de l'environnement, de site de validation (méthodes, modèles) et de lieu de formation.

## 2 - LA SITUATION DU CNRS DANS LA RECHERCHE FRANÇAISE

En association avec les laboratoires universitaires, le CNRS apparaît en France comme l'organisme de recherche couvrant le plus large spectre de disciplines concernées par l'environnement, et pouvant mobiliser le plus grand potentiel pour la recherche fondamentale en ce domaine, avec cependant certaines faiblesses dans des domaines davantage pris en compte par les autres organismes à vocation plus finalisée ou appliquée. À ce sujet, le CNRS doit veiller particulièrement à assurer de bons contacts avec ces organismes à vocation plus finalisée. En particulier, une mise en conformité pratique des actes avec le discours actuel d'une meilleure reconnaissance des recherches appliquées devrait amener à ne plus détourner les crédits destinés à des recherches finalisées vers des recherches fondamentales.

Par rapport à ces organismes plus spécialisés et souvent mieux structurés, le CNRS présente plusieurs points faibles :

- une dispersion des effectifs (globalement trop faibles) en un grand nombre d'équipes dont bien peu ont la taille critique pour jouer un rôle moteur dans ce domaine, et qui sont souvent trop sollicitées par des études d'expertise;

- un vieillissement marqué de la communauté scientifique, faute de recrutements récents suffisants, notamment en sciences de l'univers et en sciences humaines et sociales;

- un rapport technicien/chercheur notoirement trop faible dans un domaine où les besoins liés à l'instrumentation de terrain et à l'expérimentation sont en très forte croissance;

- un cloisonnement encore trop important entre les Départements scientifiques;

- des réticences à s'engager à long terme sur des programmes de recherches, sur des dispositifs

de recherches *in situ* - qui sont pourtant indispensables en matière d'environnement.

Parmi ses atouts, le CNRS dispose - avec l'INSU, d'une agence de moyens performante pour gérer les grands programmes et les grands équipements (pour les recherches surtout à l'échelle globale), - avec le *Programme Environnement* (en cours de structuration en pôles et groupements de recherche) et avec le secteur des *Sciences de la Vie*, d'instances de concertation et d'animation de la recherche en ce domaine. La contribution de la section 31 "Hommes et milieux" du secteur SHS sur l'influence de l'homme sur les écosystèmes depuis la fin du Pléistocène jusqu'à l'époque historique apportera des données intéressantes sur la réponse des écosystèmes aux premières interventions humaines. La création récente, au sein des Sciences de l'Univers, de la section 12 "Planète Terre : enveloppes superficielles", ou l'hydrologie se trouve enfin réunie aux autres géosciences, le rattachement de certaines sections à deux départements scientifiques - comme celui de la section 30 "Diversité biologique, populations, écosystèmes et évolution" à SDU et SDV -, devraient aussi favoriser, si les règles du jeu sont bien respectées, le développement de recherches interdisciplinaires sur l'environnement et le décroisement entre les départements scientifiques concernés.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

### 1 - APPORTS DES DIFFÉRENTES DISCIPLINES

L'interdisciplinarité au sein de programmes fédérateurs doit être favorisée par le CNRS pour l'étude du fonctionnement et des perturbations des écosystèmes, éventuellement en vue d'une utilisation

lion rationnelle des milieux et des ressources. Chaque discipline contribue à cette interdisciplinarité :

- *la chimie* : chimie de l'environnement, détection fine de composés spécifiques, catalyse hétérogène, caractérisation et évolution de la matière organique, établissement de bilans biogéochimiques dans les écosystèmes, gestion des déchets et réduction de leurs volumes par amélioration des rendements, épuration par les sols, biodégradation, chimie des eaux en milieux dilués, en milieux hétérogènes et aux interfaces;

- *la physique* : transfert d'eau, de masse et d'énergie dans les milieux complexes, pollution de l'atmosphère, nuisances par le bruit, prévision des risques naturels;

- *les géosciences* : étude de l'atmosphère, de l'eau, des sols, des formations superficielles et des sédiments, océanographie, hydrologie de surface et souterraine, cycles hydrobiogéochimiques, bilans de matière et d'énergie, transferts, paléoécologie, risques naturels;

- *les sciences du vivant* : génétique, dynamique des populations, fonctionnement des écosystèmes, écologie du paysage, microbiologie, santé;

- *les sciences de l'ingénieur* : génie des procédés, génie mécanique, phénomènes de transfert, phénomènes d'interface, modélisation des écoulements, traitement du signal et de l'image, mise au point de matériaux nouveaux recyclables, mise au point de capteurs, dépollutions, écologie de la restauration;

- *les sciences humaines et sociales* : paléoenvironnements, archéologie et évolution du paysage, étude des sociétés, structures sociales, démographie, écosystèmes urbains;

- *les sciences économiques* : coût de l'environnement, gestion économique des ressources;

- *les sciences juridiques et politiques* : droit de l'environnement, politique environnementale, démocratie participative, partage des ressources;

- *les sciences médicales* : épidémiologie, parasitisme, impacts physiologiques, psychologiques, psychiatriques des maladies;

- *les mathématiques* : modélisations à différentes échelles du fonctionnement des écosystèmes,

## 2 - LES THÈMES DE RECHERCHE À PROMOUVOIR

### **Etude des grands cycles hydrobiogéochimiques et de la dynamique populationnelle des écosystèmes et des paysages et de leurs perturbations sous l'action anthropique**

L'étude des grands cycles biogéochimiques et celle du cycle de l'eau, en conditions normales et perturbées, doivent être entreprises dans un souci de modélisation. Ces études doivent prendre en compte un large spectre spatio-temporel, allant de la mésoéchelle à l'échelle globale.

Les cycles hydrobiogéochimiques mettent en jeu des transferts d'énergie qui sont directement liés à la disponibilité d'éléments tels que N et P, ou divers oligo-éléments (co-facteurs d'enzymes, etc.); il sera donc nécessaire, pour étudier ces grands cycles, de définir les "petits cycles" et leurs interdépendances (emboîtements de cycles). Un effort particulier doit porter sur :

- l'analyse de processus physiques, chimiques et biologiques intervenant dans les transferts et transformations de matière avec établissement de bilans saisonniers détaillés;



- l'établissement, notamment par la télédétection et les systèmes d'information géographique, d'une cartographie des flux, des paramètres du milieu et des zones actives contributives ou réceptrices;

- le fonctionnement des zones de transition, écotones, interfaces complexes mais sensibles à toute perturbation;

- le rôle des organismes vivants dans les mécanismes et les cycles (bioconcentration, biodégradation, bioépuration, ...);

... Et ceci dans divers milieux (atmosphère, eau, sol), dans différents systèmes (terrestres, souterrains, fluviaux, lacustres et marins), et à différentes échelles spatio-temporelles.

Les perturbations apportées dans *ces* grands cycles d'éléments par les changements globaux ou les interventions humaines doivent être déterminées, ainsi que leurs incidences socio-économiques sur la gestion des ressources par l'homme.

## Etude du fonctionnement d'écosystèmes d'intérêt général

### **Les écosystèmes complexes**

- Ecosystèmes forestiers dont le rôle est fondamental dans la gestion et la conservation des ressources végétales et animales et qui interviennent dans les processus relatifs aux changements globaux;

- agrosystèmes, diminution de la biodiversité, micropolluants;

- écosystèmes méditerranéens, fragmentation des paysages, dégradation;

- écosystèmes marins : ils occupent une grande partie de la surface du globe, ont une production primaire très importante et fixent une partie du CO<sub>2</sub> atmosphérique (pompe biologique);

- écosystèmes coralliens aux nombreuses relations interspécifiques (symbioses), à biodiversité menacée par l'homme; ils interviennent dans les changements globaux par fixation du CO<sub>2</sub> sous forme de carbonate;

- écosystèmes insulaires : en équilibre ou en déséquilibre à la suite d'introduction d'espèces nouvelles;

- écosystèmes souterrains en milieu poreux et en milieu karstique, flux biotiques et abiotiques,

### **tes écosystèmes simples**

- Ecosystèmes expérimentaux aux éléments contrôlés, microcosmes;

- écosystèmes des marges glaciaires;

- écosystèmes arctiques et désertiques.

### **tes écosystèmes interactifs**

- Ecosystèmes microbiens intervenant dans les grands cycles de la nature; l'adaptation des micro-organismes aux conditions extrêmes permet la compréhension des mécanismes d'évolution (échange d'informations génétiques, inactivation ou intégration des gènes étrangers), spécificité des micro-organismes du sol et de leur écologie, intérêt de l'étude dynamique des populations au sein de la rhizosphère, mycorhization, problème de l'introduction dans la nature de micro-organismes génétiquement modifiés;

- écosystèmes planctoniques;

- les systèmes parasitaires : problèmes de co-évolution, dynamique des populations et problèmes de santé.

### **Etude de certains milieux spécifiques**

- L'atmosphère ; chimie et pollution de la troposphère, climat des pollutions, identification et quantification des sources et des puits des divers

constituants, échanges océan-atmosphère, processus hétérogènes (particules-gaz, liquide-gaz);

- le sol : importance des liens entre matière organique et matière minérale; le sol est un milieu poreux (air, eau), vivant (micro-organismes, faune), acteur et révélateur du fonctionnement des écosystèmes, et présente lui-même des fonctionnements saisonniers quelquefois très contrastés.

### ***Ecologie historique et paléoécologie, gestion de l'environnement par les sociétés traditionnelles***

Approche historique de l'évolution récente (30 000 dernières années) des milieux (écologie historique, archéologie, paléoindicateurs, paléoanthracologie, dendrochronologie); réversibilité/irréversibilité des perturbations humaines, distinctions entre changements durables et crises éphémères,

### ***Physiologie environnementale et écoéthologie***

Adaptation des populations animales et végétales aux variations des conditions de milieu à la suite d'introductions d'espèces ou de changements globaux; bilans énergétiques, comportement.

### ***Ecotoxicologie et radioécologie***

Transfert, devenir et effets des micropolluants et des substances radioactives sur les organismes vivants. Biotransformation, bioconcentration, biodégradation-

### ***Dynamique de la biodiversité et environnement***

Inventaire et suivi, de la biodiversité. Rôle de la diversité spécifique dans le fonctionnement des écosystèmes. Origine, maintien et érosion de la biodiversité. Les facteurs qui déterminent la biodiversité et ses changements doivent être mis en évidence, ainsi que les relations diversité biologique/environnement, y compris à la suite des interventions humaines (prise en compte des besoins

et effets des sociétés; introduction d'espèces nouvelles; réponse aux changements "globaux" climatiques et transformation des paysages).

### ***Ecologie des milieux urbains***

Etude de l'écosystème urbain et de son environnement (flux d'énergie et de matière, dynamique populationnelle). Perturbations par pollutions. Nuisances dues au bruit, propagation et absorption (matériaux nouveaux), effets physiologiques (audition, sommeil) et psychologiques (fatigue, stress), études prénormatives. Faits sociaux et "naturels".

### ***Risques naturels et technologiques***

- Etude des aléas : mécanismes de genèse (à long et moyen terme) et de déclenchement (à court terme) dans des buts de prévision, d'alerte et, si possible, de prévention. Recherche de marqueurs de paléoévénements pour mieux apprécier les fréquences d'événements très violents, mais très rares, par l'étude des aléas actuels ou de leurs effets passés, Application des moyens modernes de télédétection, de surveillance et de cartographie pour un meilleur suivi, en temps réel pour certains aléas. Meilleure prise en considération des facteurs aggravants liés à l'activité humaine.

- Etude de la vulnérabilité aux agressions naturelles, des structures simples jusqu'aux systèmes complexes (ensembles urbains, réseaux de transport de toutes sortes, système de communication, ...), avec un accent particulier sur les très nombreuses mégapoles situées en zone exposée (dont beaucoup dans le tiers monde) et en intégrant les aspects sciences humaines et sociales. Procédés de protection ou de confortement pour le neuf et l'existant.

- Etude des risques technologiques liés aux perturbations du fonctionnement des écosystèmes par l'introduction d'espèces exotiques ou transgéniques, par l'introduction de nouvelles molécules de synthèse, par pollutions diverses ou interventions directes de l'homme.

- Etude du risque ; mise au point de méthodologie fiable d'évaluation socio-économique du risque, détermination des objectifs et du coût de la prévention et de la prévision, critères de décision.

### ***Droit et environnement***

Définition du droit de l'environnement. Intégration de l'environnement dans les concepts de propriété et de souverainetés nationale et internationale; nouveaux modèles de décision politique, démocratie participative.

### ***Economie et environnement***

- Etude des critères et procédures de décisions collectives et des institutions devant prendre en compte les risques pour l'environnement (lois, règles, normes, systèmes d'incitation),

- Etude des déterminants socio-économiques de l'évolution des technologies, des normes de consommation et de l'aménagement spatial. Régulations économiques.

- Lien science - expertise - décision.

### ***Ecologie du paysage***

- Etude de l'hétérogénéité spatiale du paysage basée sur les concepts de tâches, matrices, corridors, définis par des paramètres structuraux.

- Etude du fonctionnement écologique des systèmes en présence.

- Etude de la fragmentation et de ses conséquences à la suite des interventions humaines.

- Aménagement et gestion des ressources intégrant les aspects socio-économiques et historiques.

### ***Ecologie opérationnelle, écotechnologie***

- Gestion écologique de l'environnement intégrant l'ensemble des connaissances sur le fonction-

nement des écosystèmes, sur leurs perturbations à la suite des interventions humaines, et sur les aspects socio-économiques qui en découlent.

- Gestion écologique des ressources renouvelables.

- Ecologie de la restauration; restauration de l'environnement, aménagement de zones anthropisées. Retombées socio-économiques.

### ***Ecologie et modélisation***

- Modélisation du fonctionnement des écosystèmes (flux d'énergie et de matière, dynamique des populations), de la gestion de ces écosystèmes (exploitation des ressources, pollutions), et des incidences socio-économiques de gestion.

- Mise au point de modèles "globaux" intégrant les conditions de milieu, les flux de matière et d'énergie, et les composantes biologiques et humaines.

## **3 - INCITATION, STRUCTURES ET ORGANISATION**

Pour limiter les effets négatifs de la dispersion thématique, géographique et institutionnelle actuelle, il est recommandé de :

- lancer de grands programmes ambitieux à long terme sur le fonctionnement de certains écosystèmes, le cycle de l'eau, les sols et les formations superficielles, les cours d'eau, les risques naturels, la gestion des milieux, ainsi que des programmes transversaux sur les changements d'échelle, les non-linéarités et leur modélisation;

- créer des équipes plus largement interdisciplinaires et des réseaux inter-organismes d'équipes, aux niveaux national et international autour notamment de certains pôles, et possédant des dispositifs de terrain adéquats;



- prévoir un effort important et soutenu de recrutement tant de chercheurs que de techniciens, et assurer un financement à long terme des recherches;

- simplifier les instances liées à la recherche sur l'environnement, en favorisant la mise en place rapide d'agences de moyens et de structures de concertation inter-organismes - tels que les GIP "Connaissance et gestion des hydrosystèmes<sup>1</sup>" ou "Fonctionnement des écosystèmes forestiers";

- créer des instituts de recherche appliquée puissants dans certains domaines - notamment celui de l'eau - pouvant assurer la continuité entre les recherches fondamentale, finalisée et appliquée, et jouer un rôle moteur au niveau international;

- mieux assurer le transfert technologique, le transfert des connaissances;

- développer les concertations, programmations, collaborations et échanges internationaux, notamment dans le cadre européen;

- veiller à un meilleur équilibre entre terrain-laboratoire-théorie-modèle, notamment en réévaluant les indispensables recherches sur le terrain actuellement trop peu valorisantes pour les chercheurs : c'est par un meilleur dialogue entre modélisateurs et chercheurs sur le terrain que pourront être constitués des jeux de données fiables et complètes qui font actuellement souvent défaut pour valider les modèles;

- mieux valoriser les recherches interdisciplinaires, notamment lors de l'évaluation des chercheurs.

Il semble important de redynamiser particulièrement, par des affichages de postes répétés et des restructurations, des disciplines comme l'écologie quantitative, l'hydrologie (tant régionale que globale), ainsi que les disciplines de la systématique. Compte tenu de l'importance de l'eau et des hydrosystèmes dans la plupart des compartiments et des aspects de l'environnement (milieux, res-

sources, écosystèmes, risques), il apparaît de plus en plus urgent, au niveau mondial, de reconnaître l'hydrologie (dans toutes ses composantes) comme une géoscience à part entière, au même titre que les sciences de la terre, de l'atmosphère ou de l'océan. De même, il semble nécessaire de favoriser une meilleure complémentarité des approches physiques (hydrique, mécanique,...), chimiques et biologiques de la genèse et du fonctionnement des sols et formations superficielles, notamment à l'échelle du paysage.

## 4 - L'INSTRUMENTATION, LES OUTILS ET LES MOYENS INFORMATIQUES

### Instrumentation

- Nécessité d'un très gros effort de mise au point de nouvelles méthodes de mesures (flux, potentiels, concentrations, paramètres, ...); développement et large diffusion d'une instrumentation scientifique de terrain et de laboratoire adaptée aux problèmes environnementaux (capteurs spécifiques, analyseurs automatiques de terrain, dosages d'éléments traces, centrales autonomes et automatiques d'acquisition et transfert de données *in situ* ...);

- mise au point de procédures de standardisation et d'intercomparaison de méthodes et de capteurs de mesure (ex. : méthodes de mesure de la teneur en eau des sols, méthodes d'extraction des solutions du sol, ...);

- accès plus large aux moyens analytiques (chimie, notamment, des micro-polluants; physique et science des surfaces; isotopie).

### Outils

- Favoriser le développement et le renforcement des réseaux de surveillance français, notamment pour la qualité de l'air, des eaux (solutés, sédiments) et des écosystèmes;

- permettre un accès plus large et plus rapide aux moyens de télédétection satellitaire et aéroportée;
- réserver des plages de fréquence pour les observations en astronomie;
- développer et renforcer un réseau de dispositifs de terrain bien instrumentés, à plusieurs échelles emboîtées : sites d'accueil pour des recherches intégrées à long terme sur des problématiques d'environnement, pouvant jouer un rôle structurant important pour la communauté scientifique.

## Informatique

- Développement des bases de données environnementales, des systèmes d'information géographique et du traitement d'images de télédétection; couplage avec des modèles de fonctionnement, des systèmes experts;
- accès aux moyens de calcul intensif (processeurs parallèles, ...) pour la modélisation des systèmes complexes; généralisation des stations de travail et des réseaux informatiques.

Des progrès sur chacun de ces trois points ne seront possibles que si en parallèle est fait un très gros effort de formation, de recrutement ou de réaffectation dans les laboratoires concernés de personnel technique compétent en *ces* domaines nouveaux.

## LA FORMATION ET LES HOMMES

En recherche, c'est entre spécialistes disposant d'une base disciplinaire forte, mais aussi d'une large ouverture d'esprit, que l'interdisciplinarité semble la plus efficace. Pour la formation en environnement,

un équilibre difficile est donc à trouver entre les formations de généraliste et de spécialiste. L'enseignement se fait actuellement sur une base plus disciplinaire que thématique.

La recherche en environnement<sup>1</sup> doit s'appuyer sur un enseignement supérieur adapté. La spécialisation dans cette discipline ne doit intervenir qu'après une formation de base solide qui nécessite la création et le développement de Maîtrises, de DEA et de DESS des Sciences de l'Environnement. Par ailleurs, un effort soutenu de formation continue des chercheurs et des personnels techniques doit être aussi entrepris dans ce domaine. Cette formation doit d'abord chercher à favoriser et à renforcer l'interdisciplinarité, en développant le dialogue entre les différentes disciplines.

## Recommandations

- Création de véritables départements des sciences et/ou techniques de l'environnement au sein des universités et TUT; développement d'une formation plus globale en hydrologie, en écologie, en génie de l'environnement, en physique et chimie, sur les bruits et vibrations, et aussi en sciences sociales et en économie;

- formation accrue à l'environnement dans les Ecoles d'ingénieurs concernées (fonctionnement des milieux, impact des activités humaines, ...);

- en complément de la formation théorique, développement indispensable d'une approche concrète des problèmes d'environnement, notamment sur le terrain, en s'appuyant par exemple sur les dispositifs de recherche *in situ*;

- augmentation des possibilités de séjours post-doctoraux tant en France qu'à l'étranger;

- développement de filières techniques (CAP, BTS,...) pour la création d'un corps technique compétent en observation et métrologie de l'environnement;

- formation continue des chercheurs et des techniciens de recherche, ainsi que des différents acteurs de l'environnement;

- sensibilisation accrue (scientifique "objective", et non "catastrophiste") de l'opinion publique à l'environnement (dès l'école primaire et dans le secondaire et par les médias, ...).

## CONCLUSIONS

L'approche interdisciplinaire est indispensable pour aborder les recherches sur l'environnement. Cette interdisciplinarité suppose, bien évidemment, la participation de plusieurs disciplines à ces recherches, mais aussi la définition en commun des thèmes de recherche, ce qui implique l'utilisation d'un vocabulaire commun, et la définition consensuelle des approches spécifiques. Le travail en

commun et la difficile mais très enrichissante confrontation interdisciplinaire ne pourront se faire qu'après de très nombreuses discussions et échanges. Le passage à la modélisation réunit généralement les approches et les valorise tout en les hiérarchisant. L'internationalisation de la recherche pousse à l'interdisciplinarité, et il faut souligner que, par rapport au dernier *Rapport de conjoncture du CNRS de 1989*, l'approche interdisciplinaire, même si elle doit encore nettement s'affirmer, a quelque peu progressé; il en est pour preuve l'association des quatre mots-clés de l'intitulé de ce thème "milieux, ressources, écosystèmes, risques".

**François Toutain**

*Président du groupe 15*

*avec la collaboration de Pierre Albrecht*

*Bruno Ambroise*

*Paul Trehen*



# 16

## ARCHITECTURE ET DYNAMIQUE MOLECULAIRES, SYSTÈMES BIOLOGIQUES

Le thème : "Architecture et dynamique moléculaires, systèmes biologiques" représente un champ très vaste, puisqu'il recouvre l'analyse des relations structure-fonction des macromolécules et de systèmes biologiques intégrés ainsi que la conception et l'étude de modèles biomimétiques. Il s'adresse donc à des systèmes de complexité variée, tant par leur architecture que par leurs propriétés fonctionnelles, allant de la macromolécule et même de ses modèles simplifiés, aux organites cellulaires. La connaissance de ces systèmes a progressé grâce à l'apport de disciplines aussi diverses que :

- *la physique*, avec la détermination des structures tridimensionnelles liée aux développements de l'instrumentation et l'étude de la dynamique moléculaire,

- *l'informatique appliquée*, avec l'élaboration de logiciels de plus en plus performants,

- *la chimie*, avec le développement des procédés de synthèse, d'hémisynthèse et l'essor de la chimie supramoléculaire basée sur les mécanismes de reconnaissance,

- *la biologie*, avec les potentialités des méthodes génétiques.

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler que les progrès spectaculaires qui ont marqué l'avènement de la biologie contemporaine trouvent leurs bases dans l'application des méthodes physiques et chimiques à l'étude des molécules biologiques. Les études chimiques et la radiocristallographie qui ont conduit à la découverte de la double hélice de l'ADN par Crick et Watson ont permis de déchiffrer plus tard le code génétique. Or cette découverte a été précédée par les remarquables travaux de L. Pauling établissant les règles de formation des structures régulières dans les macromolécules biologiques, plus particulièrement dans les polypeptides et les protéines. On ne soulignera jamais assez le rôle de pionnier qu'a joué L. Pauling dans l'évolution de la biologie moderne.

### LES ENJEUX

Les enjeux sont à la fois d'ordre scientifique, technologique et socio-économique. D'ordre scientifique d'abord; il est évident que la connaissance précise du fonctionnement des molécules et des systèmes biologiques doit être un préalable à toute application, qu'elle soit médicale ou industrielle. Une

recherche fondamentale de pointe est à la base de l'essor économique d'une industrie et d'une nation.

**La connaissance de la structure tridimensionnelle des macromolécules biologiques à l'échelle atomique** est essentielle à la compréhension de leur fonctionnement, et aussi à la connaissance de l'environnement et de l'intégration de ces macromolécules dans des systèmes biologiques complexes. Au plan technologique, les études de structure nécessitent l'emploi d'une instrumentation sophistiquée tels les diffractomètres X tridimensionnels, les spectromètres de résonance magnétique nucléaire à haut champ, l'anneau synchrotron (LURE à Orsay), les générateurs de neutrons (ILL à Grenoble, Laboratoire Léon Brillouin à Saclay). Des développements sont en cours avec l'anneau synchrotron européen à Grenoble (ESRF), le projet de Super LURE, les aimants supraconducteurs à très haut champ pour la résonance magnétique nucléaire et les spectroscopies optiques ultra rapides. L'exploitation des données expérimentales, les simulations dynamiques nécessitent l'emploi de calculateurs de plus en plus puissants et le développement de nouveaux logiciels. Les études de structure sont l'une des bases de la biologie moléculaire dont les enjeux sont considérables pour la biologie fondamentale (enzymologie, génétique moléculaire, métabolisme, immunologie...), de l'ingénierie moléculaire, des biotechnologies, de la thérapeutique. La connaissance de la structure de la molécule cible constitue une donnée importante dans la conception du médicament. La détermination des interactions protéines-acides nucléiques est l'une des bases du contrôle des mécanismes de transmission et de traduction de l'information génétique; elle passe par la connaissance structurale de complexes protéine-acide nucléique. Par ailleurs, la présence de lectines endogènes, tant dans le noyau que dans les autres compartiments cellulaires, souligne l'importance de développer des études fonctionnelles et structurales sucres-protéines. De même, la détermination des structures de complexes antigène-anticorps est un élément essentiel dans la compréhension et la maîtrise des mécanismes immunitaires et dans la fabrication de vaccins. Les études sur la structure et l'architecture des virus sont nécessaires à la compréhension des rela-

tions hôte-virus. L'étendue de l'épidémie de sida témoigne de l'enjeu considérable qu'elles représentent dans le domaine de la santé humaine.

Si les études structurales constituent un préalable incontournable à la connaissance du fonctionnement des molécules et des systèmes biologiques, elles resteraient sans objet si elles n'étaient accompagnées par **les études fonctionnelles**. Les fonctions d'un certain nombre de macromolécules biologiques, essentiellement des protéines, peuvent s'analyser en termes de reconnaissance moléculaire et de catalyse : catalyse de réactions chimiques par les enzymes, de transports d'ions par les canaux, de transfert d'électrons. La catalyse est par essence dynamique et son efficacité dépend de la structure. L'étude de la catalyse fait appel aux concepts et aux méthodes de la chimie, de la physicochimie, et de la physique.

Il est éminemment intéressant de définir des classes de fonction, des classes de mécanisme, de réactivité, qui permettront d'extrapoler d'une protéine à l'autre. En effet, la compréhension des mécanismes de la catalyse débouche sur de nombreuses applications. Pour n'en citer que quelques-unes :

- *en santé publique*, en particulier avec l'élaboration de nouveaux médicaments inhibiteurs de telle ou telle activité (le nombre de travaux portant sur les inhibiteurs de la protéase HIV en est un exemple);
- *dans le domaine agronomique*, l'adaptation des plantes aux conditions de l'environnement;
- *dans le domaine phytosanitaire*, la lutte contre les insectes, les parasites;
- *dans la protection de l'environnement*, la lutte antipollution;
- *dans l'industrie agroalimentaire* avec les fermentations, la transformation des différents composés de la matière vivante en produits utilisables industriellement;

- *en synthèse organique industrielle*, lorsque l'enzyme adéquat existe et que l'on a un problème de stéréospécificité ou de stabilité. A cet égard, la découverte des anticorps catalytiques ou abzymes offre de nouvelles possibilités par suite de leur grande spécificité. La conception d'abzymes capables de catalyser des réactions pour lesquelles il n'existe pas d'enzymes représente donc un enjeu considérable.

Dans le domaine des anticorps, des voies nouvelles sont donc ouvertes, qu'il s'agisse d'abzymes ou de vaccins. Le remodelage ou même la conception par mutagénèse dirigée et (ou) par hémi-synthèse, de nouveaux enzymes ("*protein design*") capables de catalyser spécifiquement une réaction déterminée représente une voie de recherche importante pour les biotechnologies. Ce domaine de recherche s'appuie sur les données structurales, sur les études fonctionnelles, mais il implique aussi la connaissance des mécanismes de repliement des protéines. Or le code de repliement n'est pas encore déchiffré. Les recherches dans ce domaine constituent donc un enjeu décisif. L'ingénierie moléculaire ouvre la perspective de mettre au point de nouvelles molécules actives, en particulier dans le *domaine thérapeutique*.

De plus, certaines fonctions, normales ou pathologiques, des protéines, sans relever de la catalyse, dépendent de **la reconnaissance entre macromolécules**, au niveau cellulaire en particulier, et de la réactivité chimique de la matrice protéique. Toutes sortes de modifications chimiques non enzymatiques peuvent se produire dans l'organisme sous l'influence de composants endogènes (oxydations, glycations, désamidations), ou exogènes qui vont jouer un rôle dans des phénomènes comme la transduction du signal, l'allergie, la reconnaissance immunitaire, le vieillissement certaines maladies... Ici encore, on retrouve l'interaction dynamique entre structure et réactivité dont la connaissance peut être déterminante dans la maîtrise de nombreux phénomènes biologiques et dans celle des interactions entre un organisme et son environnement.

De même, certaines fonctions biologiques sont liées à **la reconnaissance d'une petite molécule par un récepteur protéique**, par exemple les récepteurs des hormones stéroïdes. Ceux-ci font partie d'une superfamille de protéines (plus de trente ont été identifiées) dont il reste souvent à trouver les fonctions. Parmi les enjeux parfaitement identifiés, on peut mentionner les problèmes de reproduction, contraception, avortement, embryologie, ménopause, cancer, c'est-à-dire la régulation de nombreux phénomènes vitaux, le grand défi à relever réside dans la compréhension au niveau moléculaire du mécanisme des régulations dans l'organisme. Un moyen d'y parvenir serait de réaliser la détermination structurale d'un récepteur d'hormone stéroïde.

Les **lectines endogènes** constituent, chez l'homme et les vertébrés supérieurs, une superfamille de protéines divisée en trois catégories :

- les lectines dont l'activité dépend de groupes thiol et dont l'expression, régulée dans le noyau, le cytoplasme et le milieu extracellulaire, est liée aux mécanismes d'activation et de différenciation cellulaire;

- les lectines dont l'activité dépend d'un cation métallique, membranaires ou extracellulaires, impliquées dans la reconnaissance cellulaire et le métabolisme de glycoprotéines sériques et d'hormones glycoprotéiques;

- et enfin diverses lectines intervenant dans le trafic cellulaire,

Ainsi, outre leur rôle connu dans la structure et la modification de propriétés physicochimiques de certaines protéines, les glycines peuvent jouer le rôle de signal avec des lectines endogènes et offrir ainsi une alternative à l'utilisation des anticorps par la mise au point de réactifs glycaniques ou lectiniques, pour le marquage, le ciblage des drogues ou autres substances et l'imagerie médicale *in vivo*,

A côté des protéines et des acides nucléiques, **les polysaccharides** représentent une classe de



macromolécules dont l'étude est appelée à se développer. Les végétaux supérieurs, les algues et les champignons représentent des sources énormes de polysaccharides dont les propriétés physicochimiques spécifiques et variées sont sous-exploitées. Les polysaccharides de plantes étaient considérés jusqu'alors comme des substances de soutien. Récemment, il est apparu que certaines séquences saccharidiques possèdent des activités biologiques qui se manifestent lorsqu'elles sont libérées à concentration hormonale. Ces activités sont diverses ; action sur la morphogénèse et le développement des plantes, sur l'élongation cellulaire, sur la maturation des fruits ou sur l'hypersensibilité des plantes vis-à-vis de divers pathogènes. D'autres effets ont été observés sur la phosphorylation des protéines, sur les flux ioniques et la dépolarisation des membranes. Un autre type d'activité concerne les propriétés antitumorales de certains glucanes d'origine fongiques. Le développement de ces recherches constitue un enjeu important dans *le domaine de l'agriculture*.

Les connaissances dans les divers domaines du champ sont à la base des **biotechnologies** qui représentent un enjeu économique considérable dès le début du XXI<sup>e</sup> siècle. Selon le rapport de l'OCDE de 1989 : "Les biotechnologies commenceront à devenir une base importante pour la croissance dès la troisième décennie du XXI<sup>e</sup> siècle. Mais leurs conséquences qualitatives deviendront un des principaux défis de la prochaine décennie". L'essor des industries des biotechnologies aux Etats-Unis, encouragé par le gouvernement, en sont une illustration. Représentant aujourd'hui un chiffre de 4 milliards de dollars, il est prévu qu'elles atteindront 50 milliards de dollars à la fin de cette décennie. Actuellement, en plus des industries pharmaceutiques et chimiques bien établies, il existe un millier de compagnies de biotechnologies employant environ 70 000 personnes. Il s'agit donc d'un enjeu important dans la compétition internationale. Le projet français Bioavenir conclu entre Rhône-Poulenc Rorer et les organismes de recherche publique (CNRS, INSERM) témoigne de la sensibilisation dans ce domaine et de l'importance de la recherche amont pour le développement industriel.

## L'EVOLUTION ET LES TENDANCES

Plusieurs faits importants dans révolution des connaissances dans **le domaine de la biologie structurale** marquent ces dernières années. Depuis les premières déterminations de structures de macromolécules dans les années 60, on note un accroissement rapide du nombre de structures de protéines connues à résolution atomique (plus de 600 figurent dans la *Protein Data Bank*). Les méthodes de cristallisation de protéines solubles se sont progressivement améliorées. Des études systématiques de cristallogénèse se sont développées. Par contre, des difficultés importantes demeurent lorsqu'il s'agit de protéines glycosylées et de protéines membranaires. L'addition de pôles hydrophiles à des protéines hydrophobes cristallisant déjà à deux dimensions pourrait être une voie d'approche. La résolution des structures de protéines membranaires reste encore limitée; deux structures seulement sont connues, celle d'un centre réactionnel photosynthétique et celle de la porine. Les grandes difficultés de cristallisation liées à la présence de lipides constituent le facteur limitant. Le détergent qui reste associé à la protéine en cours de cristallisation joue un rôle crucial. Cependant ce domaine est appelé à un développement rapide. D'autre part, la cristallisation bidimensionnelle de protéines sur films lipidiques est une voie de recherche en pleine expansion. Ce type de cristallisation complète l'approche de la cristallographie tridimensionnelle. Les problèmes ressortent de la physicochimie des films aux interfaces. L'apport des chimistes et des physicochimistes des amphiphiles serait très positif et des contacts avec les biologistes isolant des protéines membranaires sont vivement souhaités. Un effort certain en ce sens est manifeste, comme en témoignent l'atelier sur la cristallisation des protéines membranaires au grand colloque de prospective du MRT à Bordeaux et l'atelier de formation INSERM-EMBO sur les méthodes d'étude des protéines membranaires. L'association de chimistes, de physiciens et de biochimistes dans une exploration systématique de ce type semble indispensable.

Dans le cadre des interactions entre macromolécules, protéines-protéines, ou protéines-acides-nucléiques, quelques systèmes ont été résolus, la structure de complexes inhibiteur protéique-pro téase, de complexes antigène-anticorps, de complexes protéine-acide nucléique et de complexes lectine-glycoconjugués. Enfin la structure de la chromatine est en voie de résolution.

Dans le domaine de la virologie, l'assemblage des sous-unités protéiques dans un virus répond à des principes d'architecture formalisés par la théorie géométrique de l'architecture des virus. Les virus réguliers ou simples sont ceux pour lesquels cette théorie permet de comprendre l'architecture et, pour certains, le détail des conditions d'autoassemblage. L'étude de la morphogénèse des virions et de leur stabilité suppose l'étude des interactions protéine-protéine et protéine-acide nucléique qui en sont responsables. Grâce aux études cristallographiques, il existe des modèles détaillés de deux virus à symétrie hélicoïdale, le virus de la mosaïque du tabac et le phage Pfl, ainsi que plusieurs virus isométriques d'un diamètre inférieur à 35 nm. Les virus plus gros sont connus en combinant la microscopie électronique, la diffusion des neutrons et la diffusion centrale des rayons X, comme par exemple le virus de la grippe et l'adénovirus. Les données sur les virus les plus complexes restent encore très parcellaires. Les études de diffraction sur l'intérieur de la capside ont permis de déterminer la structure atomique de la capside du virus SV40 et d'un virus proche, le virus du polyome. La carte de densité électronique de celui-ci, obtenue à une résolution de 25Å, ne met pas en évidence d'ordre régulier à l'intérieur du cœur sphérique. La structure des sites antigéniques n'a pu être déterminée jusqu'à présent que pour quelques virus : le poliovirus, le rhinovirus et le virus de la grippe. Un complexe antigène-anticorps (Fab) contenant un épitope de la neuraminidase du virus de la grippe aviaire a été cristallisé et sa structure élucidée. La région de contact contient des acides aminés issus de six boucles hypervariables du fragment Fab interagissant avec une quinzaine de résidus de l'antigène provenant de cinq boucles de la neuraminidase.

La formation du complexe s'accompagne d'un changement de conformation de l'épitope et du paratope.

L'apparition de la **résonance magnétique nucléaire (RMN) multidimensionnelle** introduit une seconde méthode de détermination des structures pour des molécules en solution; elle ne s'applique encore qu'à des protéines de masses moléculaires inférieures à 15 kdaltons. Les méthodes de modélisation moléculaire et de simulations dynamiques se sont considérablement développées. Les progrès de la chimie de synthèse et des méthodes de mutagenèse dirigée élargissent considérablement les possibilités de modifier des molécules, de préparer de nouvelles molécules et de développer la chimie biomimétique. Ceci a conduit à renforcer les interactions entre la chimie, la physique et la biologie. Le support informatique est un élément essentiel aux progrès dans ce domaine.

Le thème concernant les **interactions protéines-acides nucléiques** a une importance stratégique en biologie. En effet, toutes les molécules organiques et macromolécules présentes dans la cellule résultent de l'expression organisée directe ou indirecte d'une mémoire codée par l'ADN. Les protéines qui participent à la transcription, la traduction, la réplication et la réparation de cette mémoire posent des problèmes fondamentaux quant à leur capacité à effectuer des tâches complexes consistant à transmettre et conserver l'information, et elles sont également au cœur de développements importants en recherche appliquée. On peut distinguer quatre domaines de recherche dont l'état d'avancement est inégal, bien qu'en progrès rapides.

Le plus avancé concerne le système de traduction (code génétique-acides aminés et synthèse polypeptidique). Il comprend les tARN, les tARN synthétases, les facteurs d'élongation et d'initiation, l'ARN messenger et le ribosome activement étudiés en France. Des résultats ont été obtenus sur le plan des structures tridimensionnelles de tARN synthétases et de leurs complexes avec le t-ARN, de la classification systématique des tARN synthétises en

classes structurales et fonctionnelles, et du point de vue de la caractérisation des déterminants gouvernant la spécificité de reconnaissance entre tARN synthélaste et tARN.

Le deuxième domaine est relatif au système de transcription et de régulation. Sur le plan mondial (essentiellement aux Etats-Unis), il faut noter la résolution récente de plusieurs structures tridimensionnelles de complexes entre facteurs de transcription et des fragments d'ADN synthétiques contenant la séquence promotrice. Ces structures mettent en évidence la plasticité de l'ADN. Les protéines à "doigt de zinc" sont souvent des facteurs de transcription, les substances morphogénétiques qui gouvernent le développement dans le monde animal appartiennent probablement à cette catégorie. Aucune protéine à "doigt de zinc" entière n'a été cristallisée jusqu'à présent, mais une structure de complexe entre un fragment protéique et des fragments synthétiques d'ADN a été résolue récemment aux Etats-Unis. Des équipes françaises travaillent sur ces thèmes sans que cela ait débouché sur des structures tridimensionnelles résolues en France. La maturation de TARN (épissage des mirons) conduisant à un ARN messenger fonctionnel est activement étudiée en France sur le plan génétique et fonctionnel. Un modèle tridimensionnel d'intron autoexcisable (ribozyme) a été construit grâce à une collaboration entre Gif et Strasbourg, mais sans l'implication de la biochimie et de la physicochimie, les études physicochimiques et structurales risquent de se faire à l'étranger.

Le troisième domaine concerne la dynamique de l'ADN, son agencement dans la chromatine (compactage-décompactage) et sa réplication il est activement étudié par plusieurs équipes françaises sur le plan biochimique. La structure à résolution atomique de l'octamère d'histone vient d'être résolue par radiocristallographie aux Etats-Unis. Les girases qui permettent la réplication de l'ADN bactérien sont de plus en plus activement étudiées.

Enfin, les systèmes permettant de maintenir la stabilité de l'ADN par réparation des dommages causés par les agents chimiques et les radiations io-

nisantes sont maintenant accessibles aux études biochimiques et enzymatiques. Plusieurs équipes françaises sont très bien placées dans ce domaine. On comprend, de mieux en mieux les événements susceptibles d'aboutir à des mutations létales pour la cellule ou capables de provoquer l'apparition d'un cancer. De plus, ces systèmes sont importants pour la compréhension des mécanismes moléculaires de l'évolution. La cristallisation de ces molécules est en général difficile. Il faut cependant signaler la résolution de la structure de la protéine Rec A, aux Etats-Unis et d'une première protéine de réparation de l'ADN, la T4 endonucléase V par une équipe japonaise. Le domaine des interactions nucléoprotéiques est donc en plein développement. *Malgré des travaux importants, les équipes françaises ne couvrent qu'une petite partie du domaine concerné et il existe un déséquilibre entre la capacité française à lancer des sujets de recherche et celle qui consiste à les mener jusqu'au bout.*

**Les études fonctionnelles des protéines,** bénéficient aujourd'hui des méthodes du génie génétique, il est de plus en plus possible d'envisager raisonnablement d'exprimer une protéine peu abondante dans une cellule d'organisme procaryote ou eucaryote. On pourra ainsi disposer d'une source d'approvisionnement plus abondante et plus facilement maîtrisable. De plus, l'expression de la protéine recombinante ouvre la voie à la construction de mutants par mutagenèse dirigée et à leur étude. Ces possibilités, jointes à la connaissance d'un nombre de plus en plus grand de structures tridimensionnelles d'enzymes, ouvrent de nouvelles perspectives dans le domaine de l'enzymologie moléculaire. Elles doivent conduire à la compréhension des mécanismes de la catalyse, de la réactivité, de la spécificité et de la stabilité des systèmes enzymatiques. Elles peuvent permettre aussi de modifier la spécificité d'un enzyme, par modifications de certains résidus d'acides aminés au centre actif. Néanmoins, il convient d'insister sur le fait que toutes ces études ne peuvent que demeurer superficielles si l'on ne dispose pas d'un solide corpus de connaissances sur la protéine sauvage, qui aura été obtenu par un arsenal de méthodes physiques et chimiques dont certaines sont considérées comme



plus classiques, mais qui continuent néanmoins d'évoluer avec les progrès de l'appareillage et raffinement des concepts. Notons que ce domaine bénéficie également d'approches théoriques, qui bien qu'encore peu nombreuses, sont appelées à se développer. Ces approches consistent en général à déterminer le chemin réactionnel conduisant à la formation de l'intermédiaire de transition. Il implique la connaissance des mouvements internes de la protéine, en particulier ceux qui sont liés à la fixation des substrats. Ce genre d'étude nécessite donc l'application des techniques de dynamique moléculaire ainsi que le développement d'autres méthodes comme, par exemple, l'application de l'analyse des modes normaux pour les grandes molécules afin d'étudier les mouvements de basse fréquence. L'étude de la réaction demande l'utilisation des techniques de la chimie quantique. Le rôle de la matrice protéique, le champ électrostatique autour du site réactif provenant de la conformation moyenne de la protéine ainsi que le champ issu de la relaxation de cette matrice au cours de la réaction, doivent être pris en compte.

Dans le domaine de l'enzymologie moléculaire, les **métalloprotéines** constituent une catégorie de protéines remarquables. En effet, la présence d'un métal au site actif d'un enzyme lui confère des propriétés physiques et chimiques particulières. La biochimie inorganique et la chimie bioinorganique se sont développées à partir des années soixante, essentiellement dans les pays anglo-saxons. Les thèmes les plus en pointe en France, par l'importance numérique et le renom des équipes impliquées, concernent la photosynthèse et les hémoprotéines. Parmi les autres systèmes étudiés principalement, il convient de citer les protéines fer-soufre et les protéines à fer non-héminique. Dans tous ces thèmes, la réalisation d'analogues synthétiques des sites actifs est menée de pair avec les études biochimiques et biophysiques. Les connaissances font encore défaut dans le domaine structural. L'élucidation des structures de nouvelles métalloprotéines suppose la mise en œuvre de techniques diverses et complémentaires, telles le séquençage de protéines, la mutagenèse

dirigée, la cristallographie, les méthodes spectroscopiques. Pour ces dernières, il convient de noter que la présence d'un métal donne accès à des méthodes spécifiques comme les techniques d'absorption X et les méthodes magnétiques. L'amélioration continue des sources de rayonnement X et des procédés d'acquisition et de traitement des spectres EXAFS (*Extended X-ray Absorption Fine Structure*) permet de progresser dans la connaissance structurale des sites actifs de nombreuses métalloprotéines dont les cristaux font défaut. De plus, l'introduction récente et le développement vraisemblable des techniques XANES (*X-ray Absorption Near Edge Structure*) apportent une approche complémentaire de la précédente et constituent une avancée significative. Il est clair que l'accès dans un futur proche aux lignes de lumière de l'ESRF devrait avoir un impact très important sur le développement de ces techniques. Cependant, il convient de préciser que leur utilisation *ex nibilo* est hasardeuse, soit en raison des problèmes expérimentaux particuliers, soit au niveau de l'interprétation. Ces difficultés ne peuvent être surmontées sans une étude de molécules modèles de structure connue par diffraction des rayons X et dont les propriétés sont rigoureusement établies.

Dans le domaine de l'utilisation des méthodes de magnétisme, l'évolution, la plus marquante concerne les mesures d'aimantation. En effet, le développement simultané d'appareillages suffisamment sensibles, tels les magnétomètres à SQUID (*Super Conducting Quantum Interference Device*) et des procédés d'acquisition et de traitement, des données, va permettre une utilisation généralisée de cette technique. Les informations globales obtenues, jointes à celles fournies par les spectroscopies RPE (résonance paramagnétique électronique) et Mössbauer, conduiront à une description fine des propriétés électroniques des sites actifs, en particulier pour les sites plurimétalliques. Il convient de noter que les techniques de RMN tridimensionnelle commencent à être utilisées pour l'étude des métalloprotéines à site actif paramagnétique; ceci devrait fournir des informations intéressantes à la fois sur l'environnement protéique du site actif et sur sa structure électronique.

La compréhension des processus biologiques d'activation de l'oxygène moléculaire et la réalisation de systèmes biomimétiques d'oxydation constituent un axe important. L'étude des hémoprotéines et de leurs modèles sont à l'origine du développement de ce thème. Des résultats très prometteurs ont été obtenus ces dernières années dans la catalyse d'oxydation des hydrocarbures, domaine d'un intérêt industriel évident. La catalyse biomimétique d'oxydation de substrats relevant de la chimie fine est poursuivie également avec succès et devrait probablement trouver des applications dans des secteurs tels que la pharmacie, l'environnement et les biotechnologies. L'étude des systèmes non-héminiques (à cuivre, fer et manganèse) a commencé plus récemment et doit être développée. Une attention particulière mériterait d'être consacrée aux processus multiélectroniques impliquant l'activation de l'oxygène ( $O_2$ ) et celle d'autres molécules, telles que  $N_2$  et les molécules carbonées  $CO$ ,  $CO_2$  et  $CH_4$ . Ceci suppose qu'un intérêt plus important soit porté aux enzymes à sites actifs plurimétalliques.

Parmi les autres tendances de l'étude des relations structure-fonction des protéines, il convient de mentionner l'intérêt croissant pour l'**enzymologie aux conditions extrêmes**, c'est-à-dire dans des conditions de basses et hautes températures, sous haute pression ou à fortes concentrations salines. Les développements de la cryoenzymologie remontent déjà à quelques années; ils ont essentiellement pour but de ralentir les réactions et, par là, de détecter et d'identifier des intermédiaires réactionnels, permettant ainsi de préciser certains mécanismes catalytiques. Actuellement, l'étude d'enzymes d'organismes thermophiles (vivant dans des sources chaudes ou des solfatares), capables de fonctionner à des températures allant jusqu'à  $100^\circ C$ , fait l'objet d'un nombre croissant de travaux dont les applications sont évidentes. De plus, au cours de ces dernières années, de nombreux travaux basés sur l'influence de la pression sur la structure et les propriétés fonctionnelles des protéines ont été effectués. Initialement destinées à étudier l'influence des relations structure-fonction dans les enzymes d'organismes vivant à la pression atmosphé-

rique, ces méthodes trouvent aujourd'hui un intérêt supplémentaire du fait de la découverte, en 1978, d'organismes vivant dans les fosses abyssales volcaniques sous des pressions allant jusqu'à 600 bars,

À côté de ces aspects moléculaires de plus en plus élaborés, se développent progressivement les **aspects** cellulaires de l'enzymologie que l'on peut aujourd'hui aborder à un niveau de description rigoureux. Les progrès technologiques réalisés commencent à permettre d'appliquer les méthodes de raisonnement et les techniques de l'enzymologie moléculaire à l'étude des enzymes associés aux structures cellulaires ou incorporées à celles-ci. L'approche physico-chimique du comportement des enzymes *in situ* correspond à une tendance originale et très actuelle de l'enzymologie. le fait que les enzymes se trouvent souvent dans la cellule à des concentrations élevées et qu'ils soient fréquemment associés à d'autres enzymes sous forme de complexes multifonctionnels ou à des structures cellulaires complexes de caractère polyanionique, comme les membranes ou les parois, modifie leur comportement catalytique par rapport à celui qu'ils présentent *in vitro* en solution. Les effets diffusionnels sont à prendre en compte. Tous ces problèmes d'enzymologie cellulaire et de leur régulation sont appelés à se développer considérablement dans les années à venir. Il est aujourd'hui possible d'aborder sur des bases rationnelles les différences de comportement des enzymes en solution et des enzymes liés à des structures cellulaires. Des progrès spectaculaires ont été enregistrés récemment dans ce domaine grâce à l'utilisation de la RMN à haut champ et grâce à l'amélioration incessante des systèmes de détection et d'analyse du signal. Cette discipline a surmonté le handicap de la faible sensibilité qui limitait les observations *in vivo* aux seuls métabolites majoritaires.

L'enzymologie moderne progresse donc selon deux axes complémentaires : le premier est un aspect moléculaire de haute résolution qui inclut la dimension temporelle dans la structure; le second est un aspect cellulaire qui prend en compte le milieu biologique dans lequel s'exerce l'activité catalytique avec toute sa complexité.

Notons également que la chimie prébiotique fait l'objet de nombreux travaux incluant des expériences spatiales.

Les **protéines membranaires** ont une grande variété de fonctions qui, outre les molécules d'adhésion, peuvent être classées en deux grandes catégories : d'une part, celles qui assurent le bon fonctionnement de la cellule en permettant le transit des molécules nécessaires à ses besoins énergétiques et à ses besoins de synthèses (transports actifs, échangeurs, ...), et, d'autre part, les fonctions de coordination et de "dialogue" avec les autres cellules qui reçoivent et envoient des messages chimiques et électriques (récepteurs, canaux ioniques). A la première catégorie de protéines correspondent les récepteurs assurant l'internalisation sélective (récepteurs aux LDL ou "*Low Density Lipoproteins*" à la transferrine, aux asialoglycoprotéines) et les lectines (sélectines) responsables de la migration et de la maturation de certaines cellules du système immunitaire. La deuxième catégorie de protéines transmembranaires est impliquée dans les grandes fonctions cellulaires comme la prolifération ou la différenciation, la reconnaissance ou la sécrétion de signaux chimiques (hormones, neurotransmetteurs, facteurs de croissance et de différenciation...), la réception ou l'émission de signaux électriques nerveux, la contraction musculaire, le marquage ou l'identification au niveau immunologique. Chaque molécule constituant un message chimique extracellulaire va se fixer sur un récepteur spécifique. Le récepteur est activé par des mécanismes non encore élucidés à l'échelle moléculaire; par contre, les conséquences phénoménologiques de l'activation sont mieux connues. Il existe différents types de récepteurs que l'on peut distinguer d'après leur structure présumée et leur fonction; ce sont les récepteurs-enzymes, les récepteurs liés aux protéines G, les récepteurs canaux ioniques, les canaux ioniques sensibles au voltage et les canaux jonctionnels.

Dans ce domaine, la caractérisation fonctionnelle est parvenue à un niveau de description beaucoup plus élaboré que les connaissances structurales. La plupart de ces récepteurs sont des protéines hétérooligomériques qui possèdent un -

dans le cas des récepteurs-enzymes - ou plusieurs domaines transmembranaires. La structure de la bactériorhodopsine a servi de modèle à celle des autres récepteurs couplés aux protéines G. Ces protéines possèdent sept domaines transmembranaires. Les représentants les mieux étudiés de cette grande classe de protéines sont les récepteurs  $\beta$ -adrénergiques et la rhodopsine. Les récepteurs-canaux sont formés de plusieurs sous-unités possédant chacune quatre domaines transmembranaires. Cette structure oligomérique contient les éléments constitutifs d'un pore aqueux sélectif aux cations ou aux anions. Les canaux jonctionnels sont différents des autres canaux ioniques décrits précédemment, car ils sont formés par les protéines transmembranaires de deux membranes plasmiques accolées. Ces canaux ont une structure hexamérique formant un pore aqueux en son centre. Ces récepteurs ont un rôle important dans les organismes supérieurs où ils sont généralement la cible de drogues diverses.

Au cours de ces dernières années, la biologie moléculaire et l'immunologie ont fait avancer de façon spectaculaire la connaissance des structures de récepteurs et de canaux ioniques. En particulier, les protéines qui apparaissaient distinctes se trouvent être les membres d'une même famille. Chaque membre de la famille s'individualise par de subtiles variations dans ses propriétés biophysiques et biochimiques. Cependant les séquences d'une fraction non négligeable de protéines membranaires ne sont pas encore connues. La découverte de nouveaux ligands spécifiques pourra être l'étape décisive dans l'obtention d'une séquence protéique complète. Ce ligand servirait d'"hameçon" pour purifier la protéine et obtenir des informations partielles sur sa séquence. Dans ce domaine où l'on manque de données structurales, la mutagenèse dirigée peut être appliquée à bon escient après avoir repéré les sites importants par marquage chimique d'affinité. C'est ainsi qu'a été identifié le canal ionique du récepteur de l'acétylcholine. Le génie génétique permet aussi l'introduction ou la délétion de morceaux plus ou moins importants, l'échange de domaines entiers, la construction de chimères. L'approche immunologique de la structure des récepteurs a été abordée par la voie des anticorps anti-idiotypes : ces immu-



noglobulines monoclonales dirigées contre les parties hypervariables de l'anticorps anti-ligand permettent de caractériser le récepteur. Ces approches apportent des informations intéressantes.

**Les études de repliement et de stabilité des protéines** représentent un important domaine de recherche. S'il est admis que la structure d'une protéine est déterminée, dans un environnement donné, par la séquence des acides aminés qui la constituent, les mécanismes par lesquels une chaîne polypeptidique naissante se replie sont encore très mal connus. Cependant l'élucidation du code de repliement des protéines, cette seconde traduction du code génétique est d'une grande importance au plan de la connaissance pour comprendre et maîtriser les divers paramètres qui conduisent à la structure fonctionnelle, mais aussi pour les applications pratiques. Du point de vue pratique, cette maîtrise est essentielle pour l'obtention, par génie génétique, de protéines à haute valeur ajoutée, pour la conservation des protéines qui passe par la détermination des conditions de stabilité, pour la conception de protéines plus stables et (ou) plus actives et, ultérieurement, pour la conception de nouveaux enzymes n'existant pas dans la nature.

Les progrès dans ce domaine passent par une approche interdisciplinaire associant la physique, les mathématiques appliquées, la chimie et la biologie. Ils bénéficient de la connaissance d'un grand nombre de structures tridimensionnelles grâce aux études cristallographiques et au développement de logiciels graphiques et de calcul. Il est possible, à partir des structures connues, de tenter, par une approche théorique, de dégager des règles prédictives sur l'agencement des éléments structuraux. Dans le domaine de la biologie, les possibilités offertes par les méthodes génétiques constituent des outils précieux, pour déterminer le rôle de tel ou tel acide aminé.

Pour aborder l'étude du repliement par une approche théorique, il existe actuellement plusieurs tendances.

L'une, qui est une approche de corrélation statistique de nature pragmatique, repose sur les

banques de données de structures protéiques résolues au niveau atomique. Le principe consiste à faire adopter à une séquence donnée la structure d'une protéine homologue de structure connue et d'affiner cette structure par des minimisations énergétiques. Le nombre de structures apparaissant dans les banques de données est en croissance rapide, par conséquent ce type de modélisation va prendre de plus en plus d'extension.

Une autre approche utilise les modèles schématiques de physique statistique. Elle consiste à décrire le repliement d'une protéine comme une transition de phase de type vitreux et à expliquer pourquoi la forme repliée est unique ou faiblement dégénérée.

Une troisième approche consiste à faire replier la chaîne polypeptidique, à partir d'une structure de départ, vers une forme plus stable par des simulations théoriques de dynamique moléculaire, en se basant sur les forces physiques qui s'exercent entre les atomes. Actuellement des études prometteuses consistent en des simulations de repliement, par techniques de Monte Carlo. Cette dernière approche, bien qu'elle n'en soit encore qu'à ses débuts, a le mérite d'ouvrir la voie à l'étude du mécanisme de repliement; elle est appelée à prendre de plus en plus d'extension dans les années à venir grâce à la constante augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. L'une des difficultés majeures reste l'introduction du solvant et, plus particulièrement, de l'eau dans les calculs.

Les approches expérimentales ont porté jusqu'à maintenant sur des études *in vitro* du repliement de protéines préalablement dénaturées par un agent chimique. Elles mettent en jeu une grande diversité de méthodes, méthodes physiques (spectroscopie d'absorption et d'émission, dichroïsme circulaire, RMN), méthodes chimiques (études de réactivité des groupes des chaînes latérales), immunochimiques, enzymatiques et génétiques (remplacement par mutagenèse dirigée d'un acide aminé dont on veut déterminer le rôle dans le repliement et la stabilisation d'une protéine). Ces études exigent également l'utilisation de méthodes

de cinétique rapide afin de détecter les intermédiaires de repliement et de déterminer le (ou les) chemin(s) de repliement. Les étapes précoces de repliement, la formation de centres de nucléation, ne sont pas encore connues, même pour de petites protéines monomériques.

Les protéines monomériques de plus grande taille posent le problème des domaines structuraux en tant qu'unités de repliement indépendantes. Mais existe-t-il des motifs structuraux de plus petite taille, des sous-domaines capables de se structurer et de se stabiliser, au moins partiellement, indépendamment du reste de la molécule? Pour répondre à cette question, l'une des tendances actuelles consiste en l'étude du repliement et de la stabilisation de fragments obtenus soit à partir d'une protéine connue, soit par synthèse peptidique. Le rôle des boucles dans le repliement des protéines retient de plus en plus l'intérêt d'expérimentateurs et de théoriciens. En plus des mécanismes de repliement, les protéines oligomériques doivent s'auto-assembler d'une manière spécifique pour donner naissance à la protéine fonctionnelle.

Les études des phénomènes d'autoassemblage effectuées par des équipes françaises et européennes sur des systèmes abiotiques peuvent amener d'excellents modèles biomimétiques.

Les études de repliement *in vivo*, c'est-à-dire au cours de leur biosynthèse dans le contexte cellulaire, sont d'une approche très difficile, par suite du "bruit de fond" créé par la présence des autres constituants cellulaires et la très faible quantité de matériel. On ne dispose guère que des techniques immunochimiques pour suivre le processus. La découverte récente des chaperons moléculaires dans les processus d'autoassemblage et d'insertion des protéines membranaires a posé le problème de leur rôle d'assistance dans le repliement des protéines dans le contexte cellulaire. Les hypothèses actuelles suggèrent que les protéines chaperons s'associeraient à l'intermédiaire "globule fondu" de la protéine au cours du repliement; dans d'autres cas, les chaperons moléculaires interviendraient pour déplier la protéine, afin de permettre son insertion.

Cette découverte offre de nouvelles perspectives dans l'étude du repliement et de l'insertion des protéines membranaires qui restent encore mal connus. En effet, les protéines membranaires sont synthétisées en milieu hydrophile, puis elles sont insérées dans les membranes, soit de manière cotranslationnelle (réticulum endoplasmique), soit de manière post-traductionnelle (mitochondries, chloroplastes, peroxysomes). Jusqu'à maintenant, les travaux se sont orientés vers la détermination du rôle de la structure des protéines ou de leur précurseur dans l'efficacité des mécanismes d'insertion ou de translocation. Ces études sont principalement conduites par des approches de génétique moléculaire.

Les **principaux thèmes en émergence** peuvent se résumer comme suit :

- l'étude de **la structure et de la dynamique des macromolécules biologiques** par radiocristallographie, RMN et diffusion inélastique des neutrons. La cristallinogénèse doit être considérée en priorité, et tout particulièrement celle des protéines membranaires. L'effort doit porter dans ce cas sur l'obtention de structures, et donc de cristaux tridimensionnels. La détermination des structures, par radiocristallographie, de complexes protéine-protéine, protéine-acides nucléiques, protéine-glycoconjugués est en plein développement. Un effort devra porter sur la détermination de structure d'édifices macromoléculaires plus complexes, comme les virus,

- Le développement de la **dynamique moléculaire** est impondable pour la résolution des structures, le remodelage de protéines, les études de réactivité enzymatique et les simulations de repliement,

- Le **repliement des protéines** reste un thème essentiel. L'apport de la mutagenèse dirigée apporte des informations importantes sur les mécanismes de repliement et de stabilisation des protéines. A côté de l'approche expérimentale *in vitro* commencent à s'amorcer des études dans le contexte cellulaire, bien que celles-ci se heurtent

encore à beaucoup de difficultés. Les problèmes de repliement et d'insertion des protéines membranaires sont en voie de développement par des méthodes de plus en plus physicochimiques, et par l'utilisation des méthodes génétiques,

- Les **interactions acides nucléiques-protéines** ont une importance capitale en biologie; leur étude est à la base de la compréhension de la conservation et de la transmission de l'information dans les organismes vivants.

- **L'immunologie moléculaire** représente une thématique fondamentale pour la compréhension des mécanismes de reconnaissance antigène-anticorps. Un domaine porteur est celui de l'interaction entre antigènes viraux et complexes d'histocompatibilité des antigènes de classe I.

- **L'enzymologie moléculaire** bénéficie aujourd'hui d'une connaissance précise de la structure de nombreux enzymes, de la chimie des protéines et des méthodes de mutagenèse dirigée. Les modèles biomimétiques sont de précieux outils pour la compréhension des mécanismes analytiques, en particulier dans le cas des métalloenzymes.

- La **conception de nouvelles molécules**, qu'il s'agisse d'abzymes ou de nouvelles protéines obtenues rationnellement par génie génétique, est un domaine en pleine expansion.

- **L'enzymologie aux conditions extrêmes** (hautes pressions, hautes ou basses températures, fortes concentrations salines) suscite un intérêt de plus en plus grand.

- **L'enzymologie cellulaire** est appelée à des développements importants dans les prochaines années.

- L'étude des **protéines membranaires** laisse entrevoir des développements importants par les efforts déjà engagés et qui doivent être poursuivis dans le sens de la cristallogénèse et des déterminations structurales, L'étude des récepteurs protéiques

que sont les lectines nécessite l'analyse conjointe de leurs ligands glucidiques spécifiques, tant au niveau structural que dans le contexte de leur fonction biologique,

- La présence de séquences actives dans les **polysaccharides** d'origine végétale ouvre de nouvelles voies de recherche pour la compréhension des mécanismes d'action de ces formes actives. Ceci passe par l'étude fondamentale des relations structure-fonction de ces biopolymères qui représentent une importante source potentielle de nouveaux polymères et de nouveaux matériaux, et par la connaissance des mécanismes de leur biosynthèse.

## LA SITUATION

Il existe en France plusieurs groupes de cristallographes bien placés au plan européen et mondial à Strasbourg, Orsay-Gif, Institut Pasteur à Paris, Grenoble et Marseille. Plusieurs structures ont été résolues récemment. Des progrès remarquables ont été faits sur la structure des complexes tARN-tARN synthétase, antigène-anticorps, lectine-polysaccharides. Cependant très peu d'équipes sont spécialisées dans les études structurales des protéines membranaires, dans leur étude cristallographique. Les études de structure et de dynamique à l'aide de la diffusion des neutrons sont bien développées. Un retard important existait dans le domaine de la RMN par suite de l'insuffisance des équipements. Ce retard est en passe d'être comblé sur le plan des équipements, mais il se pose des problèmes de dispersion, en particulier des problèmes de taille critique des équipes et de l'environnement biologique, ainsi que des problèmes de formation. Dans le domaine de la spectrométrie *in vivo*, la France se trouve très bien placée. En modélisation moléculaire, des points forts existent dans le domaine des acides nucléiques, des prédictions de structures, des logiciels graphiques. Le retard se réduit dans le domaine des raffinements de structure et de la dynamique moléculaire. Il faut souligner l'impact im-



portant du programme IMABIO dans la création de pôles de biologie structurale (Institut de Biologie Structurale à Grenoble en association avec le CEA, pôles à Marseille, Montpellier, Lyon, Gif-sur-Yvette, Strasbourg) et dans le renforcement des équipes et des moyens. L'industrie pharmaceutique française semble un peu en retrait par rapport au contexte international dans le domaine des études de structure de protéines et d'acides nucléiques. L'effort semble davantage porter sur les peptides et les oligonucléotides. Strasbourg se place comme un pôle de développement dans ce domaine (opération Illkirch). Toutefois, l'ensemble des domaines ouverts à l'analyse structurale n'est pas entièrement couvert en France, par exemple dans le domaine des interactions ADN-protéine, ribozymes,,

Un gros effort a donc été accompli en France dans les dernières années pour développer les études structurales sous l'impulsion du programme IMABIO. Par contre, le programme sur les métalloprotéines et les analogues de sites actifs métalliques s'est enlisé après un décollage timide, malgré les promesses du CNRS au niveau européen vis-à-vis de l'Allemagne et de la Grande-Bretagne en particulier. On en conclut que les études de mécanisme et de réactivité sont considérées en France comme parents pauvres. Ce constat s'applique à toutes les études d'enzymologie et de chimie des protéines. Cette situation fait contraste avec la vigueur des écoles britanniques et américaines en enzymologie et chimie bioinorganique, qui sont la base de la pharmacologie moléculaire et de l'étude des anticorps catalytiques, par exemple. Il serait souhaitable que l'action incitative prévue par l'Interface Chimie-Biologie dispose de moyens conséquents.

Si la France semble relativement bien placée dans le domaine de la chimie biomimétique, ceci est dû essentiellement à l'apport de quelques équipes de pointe qui arrivent à couvrir la quasi-totalité du champ disciplinaire impliqué. Il est clair cependant qu'une impulsion serait donnée à cette thématique par le soutien de grands projets qui regrouperaient plusieurs équipes constituant un ensemble de compétences complémentaires autour d'une même thématique.

Les études de repliement des protéines ne mobilisent que trop peu d'équipes en France. Si elles sont bien placées au niveau international, les équipes qui se consacrent à ce domaine (Paris, Orsay, Saclay) auraient besoin d'être confortées au plan national, en particulier par l'affichage de postes de chercheurs et d'ETIA dans ces laboratoires. Il est urgent que de nouvelles équipes s'intéressent à ce problème.

Le domaine de l'étude des changements conformationnels des protéines membranaires en relation avec leur fonction est bien développé en France. Un nombre significatif de groupes s'intéressent à des pompes (Grenoble, Gif, Lyon), avec également le clonage du gène codant pour la pompe à  $K^+$  chez les plantes (Montpellier), à des canaux ioniques (Paris, Nice, Gif, Orsay) et à des transporteurs (Grenoble, Paris, Orsay). En ce qui concerne les récepteurs d'hormones stéroïdes, un groupe strasbourgeois s'est particulièrement distingué par la maîtrise de la technique de préparation. La solution du problème se heurtait à la quantité insuffisante de récepteurs, à leur faible stabilité et à leur difficulté d'accès. Grâce aux techniques de la biologie moléculaire, la protéine réceptrice elle-même a pu être étudiée. La bioénergétique est relativement bien étudiée, surtout au niveau de la photosynthèse (région parisienne) et de la mitochondrie (Grenoble et Bordeaux). Par contre, la biogénèse des protéines mitochondriales, chloroplastiques ou peroxysomales reste très peu représentée dans la communauté scientifique française. Seuls quelques aspects spécialisés sont étudiés à Gif et à Paris. En revanche, les équipes françaises ont une position de pointe dans l'étude de l'hétérogénéité des lipides, en particulier dans l'étude des flipases. Signalons aussi les travaux portant sur la très grande différence dans la composition des lipides membranaires qui constituent l'enveloppe des plantes (Grenoble). L'étude des phospholipides est bien représentée à Gif.

Les processus de fusion, d'endo- et d'exocytose sont étudiés à Montpellier, Strasbourg et Paris. Des progrès dans ce domaine nécessiteraient sans doute l'arrivée de nouvelles équipes.

L'analyse structurale des chaînes glycaniques est représentée en France par un groupe de réputation internationale (Lille) dont il convient de maintenir la compétitivité, L'étude des lectines animales et humaines, peu représentée en Europe, n'est effectuée en France que par des groupes pionniers de tailles diverses (Orléans, Strasbourg, Marseille, Lyon, Toulouse) dont il est impératif de renforcer le potentiel au vu de la montée en puissance des Etats-Unis et du Japon dans ce secteur de recherche. Par ailleurs, il faut souligner que la France s'est fait une place de qualité pour l'analyse aux rayons X de l'interaction glycanes-lectines (Marseille).

L'étude des polysaccharides d'origine végétale fait l'objet de programmes à long terme développés en particulier aux Etats-Unis, au Japon, au Canada, en Hollande et en Angleterre. Il existe en France quelques équipes qui ont une réputation internationale dans les divers aspects de la thématique (Grenoble, Nantes, Lille, Toulouse, Rouen, Roscoff). Elles doivent maintenir leur niveau de compétition dans les années à venir. Ce domaine a fait l'objet d'une action concertée du MRT en 1989 : "Biologie moléculaire et cellulaire végétale", programme "Oligosaccharides pariétaux : obtention, structure et effets biologiques".

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Toutes les études de structure de protéines (enzymes, hormones, anticorps, protéines membranaires, protéines d'origine végétale) doivent être développées. Un effort particulier doit être fait dans le domaine des structures de complexes; l'élucidation de thèmes majeurs comme les interactions acides nucléiques-protéines, protéines-membranes, actine-myosine, et protéines contractiles en général requiert les connaissances structurales correspondantes. En relation avec ces thèmes, l'effort important en cristallogénèse doit être poursuivi (cristalli-

sation des protéines solubles et des protéines membranaires, cristallisation de complexes). La préparation de grandes quantités de protéines pures obtenues par recombinaison génétique et leur surexpression dans des systèmes d'expression adéquats représentent la clé des études par radiocristallographie et par RMN. Dans ce cas, la production de protéines avec marquage isotopique peut devenir nécessaire. Les études par diffraction électronique de cristaux bidimensionnels doivent se développer rapidement. La radiocristallographie résolue dans le temps va progresser grâce à la mise en œuvre de faisceaux puisés. Le problème reste de trouver les bons systèmes susceptibles d'être étudiés par cette méthode. Toutes les études de structure par RMN sont appelées à se développer avec un effort particulier dans les domaines des interactions moléculaires et de la dynamique. Les approches expérimentales et théoriques de la dynamique moléculaire définissent un domaine privilégié qui doit être encouragé. En ce qui concerne les équipements, il est important qu'à côté de l'anneau synchrotron européen (ESRF), l'anneau français (LURE) demeure, tant sur le plan de l'utilisation du rayonnement synchrotron, que par son rôle de formation d'experts dans ce domaine.

À côté des études structurales, il est urgent d'encourager les équipes qui s'intéressent aux problèmes de catalyse par les enzymes, les abzymes, les ribozymes, ainsi qu'à la chimie des protéines (marquage d'affinité, réactivité chimique des chaînes latérales des protéines). En effet, une tendance actuelle fait que beaucoup de jeunes sont attirés par la biologie moléculaire considérée comme plus moderne et plus valorisante. Or ce domaine exige des connaissances multiples en chimie, physicochimie, biochimie, biologie moléculaire, immunologie. Il faut donc former de bons étudiants dans ce secteur. Une action incitatrice importante dans le domaine de la chimie des protéines serait susceptible de promouvoir des vocations chez les jeunes : l'affichage de postes bien ciblés constituerait un contexte favorable. Il faut, de plus, encourager les collaborations entre équipes à compétences complémentaires, que ce soit au niveau national ou international. A cet égard, il serait souhaitable de ren-

forcer les équipes dans lesquelles des compétences existent plutôt que de disperser les moyens. En particulier, il importe que les équipes de biologie structurale se trouvent dans un environnement suffisamment étoffé de biochimistes et, en particulier, d'enzymologistes et de chimistes des protéines. Si l'effort consenti par les organismes de recherche a, jusqu'à maintenant, porté majoritairement sur les études structurales, il devra désormais se tourner vers les études fonctionnelles. Le thème portant sur le repliement des protéines, trop peu représenté en France, devrait être conforté. **Les structures de recherche à développer sont celles qui assurent la symbiose entre ces différents secteurs.** Dans tous ces domaines, il serait souhaitable de favoriser la présence de post-doctorants dans les laboratoires. Il est crucial de pouvoir attirer des post-doctorants de la CEE dans nos laboratoires et de soutenir les jeunes docteurs français par un programme de bourses conséquent. Enfin, il convient de souligner que la cristallographie manque de jeunes et qu'il existe un problème de relais de générations; en ce sens, un effort de formation doit être consenti.

La principale difficulté en France réside dans le trop petit nombre de chercheurs et d'ingénieurs faisant de la biologie moléculaire appliquée, de la biochimie préparative et de la physicochimie des systèmes intégrés. De plus, pour que des équipes de cristallographes prennent en charge des sujets difficiles (complexes multienzymatiques, protéines membranaires, molécules intégrées à des fractions cellulaires ou existant en faible quantité), il faut de solides collaborations, des équipes étoffées et bien structurées, car ces sujets difficiles peuvent exiger des années de travail sans résultats publiables. Enfin, même avec les efforts entrepris par le programme IMABIO, il est évident que, sans une coopération et une structuration de la recherche au niveau de la CEE, les Etats-Unis et le Japon renforceront leur prédominance dans les domaines stratégiques. Les programmes de financement de la recherche par la CEE paraissent déconnectés des organismes de recherche français, et les soutiens aux recherches qui ne sont pas suffisamment orientés vers la recherche de base ne sont pas attribués de manière transparente.

En ce qui concerne le matériel, il conviendrait de banaliser les systèmes de graphisme moléculaire dans les laboratoires et de donner assez de crédits de jouvence pour que tous les appareils courants soient équipés de bons systèmes d'acquisition et de traitement des données.

Des interactions se sont établies entre la chimie et la biologie, manifestant la volonté de décloisonnement du CNRS. On ne peut que s'en réjouir. Elles devraient être renforcées. La création de structures horizontales, comme l'interface chimie-biologie, et le fait que les sections 20 et 21 du CNRS relèvent des deux secteurs constituent un premier pas important. Il conviendrait de trouver un moyen d'établir des interactions avec la physique. Toutefois ces structures devraient être dotées de moyens suffisants. Les incitations devraient porter sur le regroupement de biologistes, chimistes, physiciens, d'une part, et sur le renforcement des collaborations et des équipes n'ayant pas encore la taille critique, d'autre part. Dans ce cadre, les problèmes de régionalisation devront être pris en compte au plan scientifique. Dans un but de décloisonnement, il serait souhaitable de favoriser, à l'échelon local et lorsque les compétences se trouvent réunies, la création de groupes de recherche interdisciplinaires (physique/chimie/biologie). La création de telles structures favoriserait la mise en commun de compétences et de moyens. Un soin tout particulier doit être apporté aux restructurations et à la relève des générations qui devraient toujours avoir comme base de départ la qualité des projets scientifiques, les compétences reconnues et un certain consensus. A cet égard, la procédure d'appel d'offre avec examen des dossiers par un conseil d'experts internationaux - ou tout au moins européens - est souhaitable et assurerait le consensus. Enfin, une recommandation importante doit être faite : **il est nécessaire d'assurer le suivi de toutes les opérations-**

Pour la formation des étudiants, un gros effort est à faire au niveau de l'interface chimie/biologie, dans les 2ème et 3ème cycles de l'enseignement supérieur. Il importe, d'une part, d'augmenter le niveau de connaissances en chimie des étudiants de



biologie, d'autre part, de donner un niveau minimum de biochimie et de biologie à des étudiants de chimie. A cet égard, un projet de maîtrise chimie-biochimie a été évoqué à Orsay, le magistère de Strasbourg répond à ce souci. En ce qui concerne les troisièmes cycles, il convient de rappeler l'existence du DEA d'enzymologie, physicochimie et ingénierie des protéines d'Orsay, pour lequel une cohabilitation avec le CEA et l'Ecole polytechnique vient d'être obtenue. Ce DEA forme les étudiants dans les différents domaines de l'Enzymologie, de la chimie et de l'ingénierie des protéines et de la biologie structurale. Plus finalisé vers la biologie structurale, le DEA de cristallographie et RMN des protéines commun à Orsay, Grenoble et Strasbourg forme des spécialistes dans ce domaine. De création plus récente, le DEA de chimie bioinorganique d'Orsay est centré sur le rôle du métal en biologie, les métalloprotéines et la chimie biomimétique. Ces trois DEA, appartenant respectivement aux secteurs biologie, physique et chimie, se sont regroupés pour présenter une école doctorale intitulée "Structure, fonction et ingénierie des protéines". Le DEA "Biochimie-biologie, intégration des protéines"

commun à Paris VII et Paris VI s'inscrit dans la même préoccupation. Notons aussi l'existence du DEA de biophysique commun à Paris VI, Paris VII, Orléans et l'Ecole Centrale et le DEA de chimie des biomolécules de Montpellier qui se situe à l'interface chimie-biologie. Il est certain qu'un effort plus important de formation d'experts en physicochimie des protéines doit être fait en France pour faire face à la compétition internationale

Dans le domaine de la formation, plusieurs recommandations doivent être faites. Dans le cadre du CNRS, l'effort de formation entrepris récemment, en particulier les écoles IMABIO, devra être poursuivi. Une formation en informatique pour les ingénieurs d'étude est souhaitée afin de promouvoir des ingénieurs en informatique de bon niveau. De même, il est important d'assurer la formation de personnels qualifiés dans les différentes disciplines du champ.

**Jeannine Yon-Kahn**  
Présidente du groupe 16

# 17

## EVOLUTION : DU GENOME AUX BIOSYSTEMES

### INTRODUCTION

Pendant des siècles, le monde vivant a été organisé, dans l'esprit des hommes occidentaux, en une série de cercles dont ils occupaient le centre et dont les anneaux étaient d'autant plus distants que les êtres qui s'y trouvaient leurs ressemblaient le moins. Deux siècles d'Histoire Naturelle ont permis de comprendre que tous les êtres vivants appartiennent au même arbre généalogique, ce que les découvertes de la biologie moléculaire nous ont confirmé en mettant en évidence l'unicité du matériel vivant, tandis que les apports de la génétique nous permettaient d'appréhender *les* mécanismes qui expliquent la variété individuelle et spécifique des formes.

Dans le même temps les Sciences de la Terre nous ont révélé que notre planète a connu d'immenses changements au cours de son histoire. Les continents ont dérivé, des forces énormes ont fait surgir des chaînes de montagnes, les mers ont tour à tour inondé puis découvert de vastes régions, les climats se sont plusieurs fois modifiés. La répartition des espèces vivantes dans les provinces biogéographiques reflète la chronologie de ces événements et nous savons maintenant que, depuis que la vie est née de la matière, l'histoire de l'une et celle de l'autre sont demeurées constamment et étroitement liées. Plus récemment, les progrès de

l'astrophysique nous ont permis de reconstituer les quinze derniers milliards d'années de l'histoire de l'Univers, nous amenant à rechercher si la Vie, qui nous paraît pour le moment si étonnamment circonscrite à la Terre, n'a pas pu se développer à la périphérie d'autres soleils...

Comprendre et organiser le savoir concernant l'apparition de la vie et le développement de la biodiversité aux niveaux d'intégration allant du génome aux organismes et aux populations, dans sa dimension historique, constitue donc le thème de l'étude de l'évolution. Ce thème est le point central que les disciplines de la biologie partagent avec les sciences de la Terre et de l'Univers.

### LES ENJEUX

A l'horizon du XXI<sup>e</sup> siècle, les sciences de l'évolution doivent répondre à des interrogations dépassant les objectifs fondamentalistes et philosophiques qui demeurent d'autre part les leurs. Outre l'influence que l'élaboration de concepts nouveaux leur donne sur la pensée et la culture scientifique, elles doivent aussi permettre de tirer parti des connaissances acquises pour mieux connaître, gérer et protéger l'environnement et, en particulier, inventorier et préserver les espèces qui

peuplent la biosphère, contrôler l'impact des activités humaines, contrôler l'évolution et le développement de certains organismes d'une manière qui soit favorable à l'homme (médecine, microbiologie, parasitologie, lutte biologique, génie génétique, etc.).

## LES ENJEUX PHILOSOPHIQUES ET CULTURELS

Dans un monde où se développe la sensibilité dite écologiste et où les intégristes de tous bords tentent de revivifier les vieilles superstitions créationnistes, les sciences de révolution peuvent apporter aux hommes des informations leur permettant d'envisager une représentation cohérente de leur univers depuis ses origines, de leur propre histoire au sein de la biosphère. Cette possibilité est d'autant plus importante que les hommes vont devoir faire face aux responsabilités que leur donnent l'accroissement de leur nombre et l'efficacité de leur technique.

En plaçant l'Homme au sommet de l'échelle des êtres vivants, la théorie de l'évolution ne se détachait pas du cadre prescrit par les principes fondamentaux de la culture occidentale : la Bible dit que Dieu a créé les êtres de la Nature pour les mettre au service de l'Homme.

En admettant que l'évolution est *un enchaînement causal, originellement déterminé par le hasard*, nous développons une vision du monde vivant qui interdit à l'Homme de se situer dans une échelle de valeurs par rapport aux espèces avec lesquelles il partage la biosphère et l'amène à analyser sa responsabilité dans l'appauvrissement de la biodiversité, au moins autant en termes éthiques qu'en termes militaires. Nous nous rapprochons ainsi d'autres cultures, qui ont du monde une conception différente, et dans lesquelles les relations aux autres êtres vivants participent du fonctionnement du social.

## ANALYSE DE LA BIODIVERSITÉ ET PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

### Compléter l'inventaire des formes vivantes

La biodiversité est une composante essentielle de la qualité biologique et écologique de notre environnement. Le public et les décideurs découvrent actuellement que *l'inventaire des formes vivantes est très loin d'être achevé*, même dans des groupes que l'on considère comme bien étudiés (exemples : la découverte d'une nouvelle espèce de singe, *Cercopithecus solatus*, Harrison en 1984, au Gabon); la découverte de 130 espèces et 70 genres nouveaux de blattes en Guyane en 1991). On estime que les 1,4 million d'espèces animales actuellement recensées représentent, tout au plus, 20 % du nombre total que nous ne savons apprécier qu'à un facteur dix près (entre 5 et 80 millions). Nous manquons par conséquent des connaissances de base pour préserver l'environnement.

La dégradation rapide des milieux, du fait de l'impact des activités humaines, rend urgent que cet Inventaire fasse l'objet d'une réflexion approfondie, en donnant la priorité aux régions les plus menacées. Les programmes d'étude de la biodiversité sont donc devenus une priorité absolue des dix années à venir pour la N3F, l'IUBS, le SCOPE et l'UNESCO. Lors de sa réunion en septembre 1991, le Comité de l'IUBS pour le Programme Scientifique a notamment rédigé la résolution suivante : *"la 24ème Assemblée Générale de l'IUBS, considérant l'importance du savoir concernant la diversité biologique et le changement global (...), relevant l'insuffisance des moyens accordés aux organismes de recherche, spécialement en systématique biologique, recommande à toutes les autorités concernées, d'adopter et de mettre en action le Programme Diversité Biologique de l'IUBS en renforçant les budgets de recherche des instituts dont elles ont la responsabilité, afin de leur donner tous les moyens nécessaires pour y participer"*.



Ces moyens doivent permettre que soient harmonieusement soutenues les recherches, aux différents niveaux d'intégration auxquels on peut envisager d'étudier la biosphère : gènes, organismes, populations, espèces, peuplements. Ces études ne peuvent se faire sans l'existence de banques de matériels et sans que l'information soit stockée et organisée dans des banques de données.

## Les banques de matériels

Les archives et banques de matériel biologiques sont représentées par les *collections d'objets d'histoire naturelle* (fossilisés, naturalisés, fixés, congelés ou lyophilisés, élevés, cultivés ou introduits dans des banques de gènes). Elles sont à la fois les références incontournables pour l'identification, et le support des recherches présentes et à venir dans l'ensemble des champs fondamentaux et appliqués de la biologie. Au moment où la biodiversité devient l'objet d'enjeux non seulement scientifiques, mais également socio-culturels et politiques, le besoin de continuer à les enrichir est reconnu, notamment en Europe du Nord, aux Etats-Unis, au Canada, en Australie et en Nouvelle-Zélande. Les liens étroits qui les lient à la protection de l'environnement ont été soulignés, de même que l'urgence de les réaliser dans les milieux tropicaux, particulièrement menacés. Certains pays, comme les Etats-Unis, qui ont investi plusieurs millions de dollars en 1991 dans une opération de collecte méthodique à Madagascar, ont déjà entrepris la constitution d'énormes banques de matériels dont l'exploitation s'étendra sur des générations de biologistes, alors même que les régions dont elles sont issues auront disparu en tant que milieux naturels.

Ces banques de matériel ne demeureront accessibles et exploitables qu'à condition que leur soient donnés les *moyens* permettant de les *entretenir*, de les *enrichir* et de les *ordonner*.

## Les banques de données et (es) bases de connaissance

Les banques de données biologiques sont représentées par *l'ensemble des documents décrivant les êtres vivants* : faunes, flores, monographies, manuels, revues, etc. En matière de recherche, seules les bases de données informatisées sont à même d'apporter une solution satisfaisante au problème de l'accès intelligent à l'information scientifique et aux résultats de la recherche, autre que la consultation des revues ou périodiques spécialisés. Elles sont indispensables à la représentation, au stockage et à l'utilisation de données obtenues dans des systèmes complexes : études génétique et moléculaire, phylogénèse, morphogénèse, faunes et flores, étude d'un écosystème, etc. La représentation informatique des connaissances est d'autre part souvent le premier pas vers la modélisation, étape clef de la compréhension d'un système, ou encore vers la création de systèmes experts.

Ces documents sont un des outils de la recherche; ils ont, de plus, une dimension culturelle et éducative. Ils doivent être accessibles aux chercheurs, aux professionnels des biotechnologies et aux étudiants.

## Systématique et systématiciens-experts

L'analyse de la biodiversité, ainsi que la création ou l'enrichissement des banques de matériels et des bases de données, implique l'existence d'une *systématique vivante*.

Il y a donc urgence à recueillir les connaissances et l'expérience des systématiciens; près de la moitié d'entre eux seront à la retraite dans moins de dix ans, et, faute de successeurs, ils ne transmettront leur savoir à personne. l'investissement financier qui a soutenu leurs travaux est important, même s'il a été régulièrement en s'amenuisant, et ne doit pas être perdu. Ceci va de

pair avec la réhabilitation dans l'enseignement, dans le recrutement et dans la formation des jeunes chercheurs et ingénieurs, des connaissances susceptibles de leur donner les éléments *d'une véritable culture générale scientifique* et en particulier *une formation de biosystématique générale* incluant la connaissance des méthodes taxinomiques modernes.

Il est également souhaitable de prévoir une relation intellectuelle active entre les chercheurs intéressés par la connaissance de la structure et des fonctions du génome, et ceux qui étudient la biodiversité. L'apport des premiers sera essentiel à la compréhension par les seconds de l'adaptabilité des individus et des espèces, des flux géniques intra et interspécifiques et, à terme, de l'évolution globale de la diversité génétique.

## CONNAÎTRE ET ÉVALUER L'IMPACT DES SOCIÉTÉS HUMAINES

Pour ce qui est des milieux, il est important de comprendre les mécanismes biologiques concernés par chaque type particulier d'intervention, et non pas se borner à appréhender globalement les impacts. C'est à ce prix que Ton pourra mettre en évidence les relations entre les phénomènes de seuils, L'enchaînement des processus, et le fonctionnement d'ensemble des sociétés. Nous en savons plus actuellement sur les pratiques qui détruisent la diversité biologique, que sur celles qui la développent et l'entretiennent. Dans ce domaine, la connaissance des savoirs et savoir-faire permet de comprendre les phénomènes dans leur dimension temporelle, Une approche anthropologique globale de la gestion des relations qu'une société entretient avec son environnement est donc nécessaire, aussi bien pour repérer les articulations entre le socio-culturel et le biologique, que pour comprendre quels liens l'attitude générale vis-à-vis du vivant peut avoir avec le devenir des organismes.

## PROBLEMATIQUES EN ÉMERGENCE, OU À DÉVELOPPER

Les Sciences de révolution tentent de dégager les mécanismes et les processus qui expliquent l'apparition, l'organisation et le déploiement de la biodiversité, en étudiant le fonctionnement des systèmes ayant la capacité de se reproduire : du gène à l'individu, de l'individu à la population et de la population à l'espèce et au peuplement. L'étude du fonctionnement repose sur une analyse de la structure de la biodiversité dans le temps et dans l'espace. Cela implique des bilans systématiques en terme de taxinomie (reconnaissance des taxa) et en termes de biologie (définition des attributs étho-écologiques des espèces). Cela implique d'autre part la mise en place d'hypothèses phylogénétiques et de scénarios évolutifs permettant de reconnaître et de lier les unités structurant la biodiversité,

## STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES GÉNOMES

L'évolution n'est possible que grâce à l'existence de la variabilité génomique. La structure du génome est aujourd'hui comprise comme la résultante d'un *équilibre dynamique* à l'intérieur duquel l'évolution d'un fragment petit résulter de multiples mécanismes, tant populationnels que moléculaires. Malgré les progrès accomplis, notre connaissance de sa plasticité, au moins en ce qui concerne les eucaryotes, n'est encore que fragmentaire et préliminaire, les progrès dans ce domaine sont à attendre des grands projets de séquençage (génome humain, etc), des recherches sur la régulation de l'expression du génome et de l'avancement des connaissances sur la génétique du développement : mise en place des plans d'organisation et des grandes fonctions.

## Séquençage de l'ADN

### *Séquençage du génome humain et pathologie*

Par leur fréquence et par leur coût, les maladies génétiques représentent un enjeu très important sur le plan humain et économique. Pour un nombre important de maladies génétiques monogéniques, les gènes responsables ont été localisés, puis identifiés, et l'altération moléculaire responsable de la maladie a été reconnue. La dissection du phénomène pathologique induit par la mutation peut alors concourir à la conception d'un traitement palliatif. Pour passer de l'identification du locus impliqué à celle du gène responsable, le travail nécessaire peut être allégé par l'existence de réarrangements chromosomiques ou par la présence d'un gène candidat dans la région. Dans les autres cas, la recherche d'exons, voire le séquençage, restent les seuls outils utilisables.

Il n'en va pas de même pour les maladies dans lesquelles plusieurs gènes sont impliqués et où des facteurs environnementaux jouent un rôle dans le déclenchement de la maladie. Dans ces maladies, l'identification des gènes impliqués nécessite la réalisation d'études cliniques fines portant sur de nombreuses familles atteintes, l'utilisation de marqueurs génétiques très polymorphes répartis sur le génome et l'adaptation des moyens informatiques et techniques (séquenceurs automatiques), seuls capable d'assurer la réalisation de milliers de génotypes dans un délai et avec un coût raisonnables.

En quelques années, le développement de ces recherches non seulement a permis de progresser considérablement dans la connaissance de la structure et des mécanismes du génome, mais il est également à l'origine d'une véritable révolution technologique, qui a enrichi tous les domaines afférents.

## Séquençage des génomes d'organismes différenciés simples

L'analyse du génome d'organismes simples (comme *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* ou *Caenorhabditis elegans*), devrait permettre la découverte des règles de la détermination embryonnaire et de la différenciation cellulaire. Mais les stratégies de différenciation des animaux et des végétaux sont très dissemblables : en particulier, tout ce qui relève de la photosynthèse et des interactions entre le génome du noyau et celui des chloroplastes est d'un très grand intérêt, et spécifique du monde végétal. C'est pourquoi un effort sans précédent s'est porté sur la connaissance complète du génome relativement simple (cinq chromosomes et quelques mégapaires de bases) d'*Arabidopsis thaliana*.

Le projet de disposer de la connaissance complète du génome de la levure date déjà de quelques années. La qualité majeure de ce projet - par comparaison avec ceux, qui sont développés sur les génomes d'espèces pluricellulaires - tient à l'existence chez la levure d'une génétique réverse qui permet de valider l'information issue d'un séquençage et d'analyser la fonction de gènes nouveaux. De l'analyse du génome de la levure sont attendus trois types de connaissances : celles de l'ensemble des gènes qui permettent la vie autonome d'une cellule eucaryote, et de leurs relations qui entraînent la cohérence instantanée de l'organisme et de l'identité de l'espèce au long des générations; celles qui portent sur les lois d'organisation des chromosomes (origine, stabilité, duplication, appariements et recombinaisons, transmission : mécanismes moléculaires mis en œuvre, événements aléatoires et pressions de sélection); celles, plus méthodologiques, qui conduisent à maîtriser l'analyse d'ensembles considérables d'informations élémentaires (le chromosome III par exemple est composé de 317 kb).

## Régulation et expression des génomes

Deux questions ont une importance particulière : celle de l'étude des mécanismes générateurs



de la plasticité, et celle des mécanismes régulant la plasticité. Les avancées dans ces domaines relèvent, en partie, d'une meilleure connaissance de l'ensemble des processus impliqués dans la réplication et la réparation du matériel génétique, la recombinaison au sens large (incluant la transposition), et les variations du nombre de copies, normalement uniques ou répétées.

### **Répétition des séquences et plasticité**

Les progrès de la connaissance de l'ADN montrent que l'arsenal moléculaire est capable de créer des répétitions de séquences dans le génome. Les plantes et les animaux y ont trouvé la source des familles multigéniques impliquées dans la différenciation cellulaire; en contrepartie leurs génomes se sont alourdis de séquences éventuellement "égoïstes". A l'opposé les bactéries et de nombreux champignons ont minimisé ou éliminé ces répétitions. Il se pourrait que le mécanisme sous-jacent soit le comptage par une cellule des séquences identiques qu'elle contient. Selon les circonstances ces répétitions peuvent permettre l'inactivation génique, l'archivage temporaire de séquences, l'isolement interspécifique, aussi bien que les transferts horizontaux de gènes entre espèces, contribuant ainsi à accroître la diversité génétique. Les mécanismes par lesquels s'équilibrent les pressions opposées de l'isolement ou de l'accueil de gènes étrangers, impliquent différentes stratégies d'évolution, et doivent être connus, si Ton veut pouvoir évaluer la stabilité de la diversité génétique et son devenir évolutif,

### **Mutagenèse et réparation**

Dans tous les organismes vivants, il existe un équilibre subtil entre les mécanismes qui assurent la stabilité de l'information génétique et ceux qui permettent sa diversification (mutagenèse, recombinaison entre séquences homologues, mais non identiques, transposition), sans pour cela qu'il soit correct d'assimiler, de façon générale, les mécanismes de mutagenèse, qui dépendent de protéines spécifiques, à des erreurs de réparation. Les mécanismes par lesquels les lésions de l'ADN in-

terfèrent avec le métabolisme normal du génome comprennent :

- d'une part *les mécanismes de réparation*, par excision ou par recombinaison, qui sont très performants, et grâce auxquels les organismes vivants maintiennent l'intégrité de leur génome; les systèmes multiprotéiques, qui assurent la réparation de l'ADN reconnaissent une grande diversité de lésions (coupure simple brin, adduct DNA-cancérogène), et impliquent des signaux totalement différents de ceux qui interviennent dans les interactions spécifiques entre protéines et acides nucléiques; ce n'est pas une séquence de nucléotides qui est reconnue par les systèmes de réparation, mais "l'absence" de structure canonique; des concepts nouveaux de reconnaissance entre protéines et acides nucléiques émergeront de ces études;

- d'autre part, *les mécanismes de mutagenèse* dont la génétique et la biochimie sont encore largement inconnues; en général on admet que les mutations s'installent lors de la réplication de l'ADN, lorsque celui-ci contient des lésions (modifications covalentes de l'ADN); les mécanismes de réplication de tels substrats endommagés restent à découvrir (identification et purification des protéines accessoires de la réplication qui interviennent dans la "synthèse translésion" ou "bypass"); ce domaine devrait connaître un essor important à moyen terme (en France très peu de groupes étudient les mécanismes de réplication normale et, a fortiori, la réplication des substrats portant des lésions); par ailleurs, il est de plus en plus clair qu'il existe plusieurs trajets de mutagenèse; leur caractérisation sur le plan génétique, puis sur le plan biochimique, est un domaine qui est amené à se développer; certaines séquences particulières de l'ADN s'avèrent être des points chauds de mutation; les relations entre points chauds de mutagenèse et structure locale de l'ADN constituent un domaine en pleine évolution.

D'une façon générale, la compréhension des mécanismes de réparation est plus avancée que celle des mécanismes de mutagenèse. Les micro-organismes (bactéries, levures) sont un matériel de

choix qui permet de découvrir les stratégies fondamentales mises en jeu dans les cellules, le passage aux organismes plus complexes se fait dans un deuxième temps : ceci est actuellement le cas pour la réparation par excision chez l'Homme, où les nombreux gènes impliqués sont en cours de clonage et de purification. L'étude des mécanismes de réparation chez *E. coli* pourra être abordée dans le futur proche par les techniques de biologie structurale (RMN, cristallographie).

### Reconnaissance ADN protéines

Une protéine qui régule l'expression d'un gène reconnaît sa cible grâce à un motif, commun à un grand nombre d'entre elles, appelé "*hélice-tour-hélice*". Pour qu'elle puisse se fixer, il faut que la concentration d'un médiateur ait passé un certain seuil, et que la protéine ait contacté l'enzyme qui va transcrire l'ADN en ARN au point de démarrage de la transcription. Ces fonctions différentes sont souvent portées par des domaines distincts de la protéine activatrice, dont il est, dès maintenant, indispensable d'approfondir l'organisation. Créer des protéines hybrides AB reconnaissant la cible de la protéine A sur l'ADN mais portant le site du récepteur B est du plus haut intérêt pour la biologie du développement. Ceci sera fait plus sûrement si Ton sait "*où couper exactement les gènes codant respectivement pour A et pour B*" avant de les "*réassocier pour avoir un gène codant pour AB*". Ceci suppose un progrès important dans la prédiction de l'organisation des protéines en domaines (repliement des protéines).

Différents modes de reconnaissance de l'ADN correspondent à différents degrés de déformation de la structure canonique de celui-ci. On distingue : une déformabilité séquence-spécifique autour de la structure B de l'ADN (gamme de temps, modules de flexion); des déformations plus importantes et jouant un rôle dans les mécanismes de régulation, dans les cas où l'ADN est courbé autour d'une protéine (gamme de temps, spécificité de séquence); des cas de structures totalement différentes de l'ADN B, qui peuvent être des intermédiaires de réaction pour des processus physiologiques plus complexes, comme la recombinaison.

Un activateur qui agit sur un enzyme qui se déplace sur l'ADN affecte des constantes de vitesse. Ceci pose le problème de l'évolution des notions de la cinétique structurale ; comment estimer la déformation d'une structure d'acides nucléiques lors de la translocation d'un enzyme ? Le couplage mécano-chimique reste un domaine "*devant nous*". Les études statistiques sur des populations de molécules se combinent aujourd'hui avec des études sur macromolécules isolées. Ces études passent par l'accélération de l'obtention des données en biologie moléculaire et le recensement des motifs de structure avec lesquels sont bâties les protéines. Cette combinatoire est très grande, mais non pas infinie.

### Les ARN

Les ARN sont les seules molécules à être *a priori* à la fois matériel génétique et enzymes. Ils jouent aussi un rôle fondamental dans des processus aussi différents que la réplication (Ces amorces sont en général des ARN), le passage de l'information génétique de l'ADN au système de traduction (la transcription de l'ADN en ARNm), la synthèse des protéines (via les ARN de transfert et les ARN ribosomiques) et son contrôle, ainsi que l'épissage des ARNm nucléaires.

### Ribozymes

Depuis la découverte en 1982 des ribozymes (miroirs de classe I, RNase P), ces molécules d'ARN clouées d'activité catalytique (RNase, transphosphorylation, ligation) ont suscité beaucoup d'intérêt, et ce concept a notamment été étendu aux miroirs de classe II. Plus récemment (1986), des structures ribozymiques ont été mises à jour dans de petits ARN infectieux (viroïdes, virusoïdes, ARN satellites) : c'est le cas notamment des ribozymes en T et en L du ribozyme du virus HDV. Les données phylogéniques et celles de mutagenèse *in vitro* ont conduit à des modèles hautement probables de structures 2D. Comme dans les complexes enzymes-substrats classiques, la mise en place des groupes catalytiques vis-à-vis du substrat résulte de repliements

tertiaires. L'identification des groupes catalytiques et l'élucidation des structures 3D des domaines ribosomiques suscitent le développement de nouvelles approches (substitutions et modifications chimiques localisées, sélection *in vitro* de mutants...) dont les retombées sur l'étude de la structure des ARN seront importantes. Un modèle plausible de structure 3D pour les introns de classe I a déjà été proposé.

Les ribozymes en T et en L sont notamment susceptibles d'être dirigés sur une cible ARN qu'ils peuvent cliver en position spécifique. Cette propriété permet de les utiliser comme "RNase de restriction" *in vitro* et comme outil de modulation spécifique de l'expression d'un gène *in vivo*. Le problème demeure du choix de la séquence visée sur l'ARN cible, qui a nécessairement une structure au moins partiellement contrainte dans les conditions d'activité biologique. On peut vraisemblablement attendre des développements thérapeutiques dans ce domaine.

Enfin l'élucidation du mécanisme catalytique des ribozymes et la découverte éventuelle de nouvelles enzymes à ARN fourniront des données précieuses sur le domaine très spéculatif des origines de la vie.

### **Epissage**

L'épissage est une étape qui revêt une importance fondamentale dans l'expression des gènes. En effet, chez les Eucaryotes, les transcrits nucléaires doivent subir plusieurs étapes de maturation avant d'être exportés du noyau vers le cytoplasme où ils seront traduits en protéine. L'épissage élimine les séquences introniques du transcrit primaire. L'importance de ce mécanisme est illustrée dans certaines pathologies ( $\beta$ -thalassémie, phénylcétonurie, dystrophie) où un épissage aberrant dû à des mutations entraîne l'absence de la protéine ou la production d'une protéine anormale. L'intérêt porté à l'épissage en tant que mécanisme fondamental de l'expression des gènes s'est accru avec la découverte de l'épissage alternatif, processus qui permet, à partir d'un seul et unique transcrit, la synthèse de plusieurs protéines. Ce mode de régulation est largement utilisé par la cellule, tant pour l'expression

de protéines de fonctions différentes, voire antagonistes, que pour la mise en place de processus biologiques variés. A cet égard, on peut citer le déterminisme sexuel chez la *Drosophile*, la production de protéines possédant un pouvoir anti-oncogénique, la mise en place de programmes morphogénétiques, ou encore la synthèse de protéines dépendant de la différenciation tissulaire et/ou du stade de développement.

### **Reconnaissance ARN Protéines**

Ce qui caractérise les ARN, c'est la flexibilité de leur structure. De plus en plus on s'aperçoit qu'il existe des structures utilisant des appartements non "Watson-Crick"; "Tetraloop" d'une stabilité inhabituelle, pseudo-noeud, etc. Ces structures ont une importance primordiale en ce qui concerne la reconnaissance des ARN par les protéines, notamment les ARN messagers par les ribosomes et les enzymes dégradatifs. Le mécanisme de reconnaissance est très différent de celui des acides désoxyribonucléiques. Il apparaît que les protéines reconnaissent une conformation globale (ex tARN), mais que la spécificité dépend d'un nombre de bases très limité.

Les interactions entre les tARN et les synthétases sont pour l'instant le meilleur système pour étudier les interactions ARN-protéines. Le domaine a tout dernièrement profité de trois percées essentielles; La spécificité de reconnaissance entre une aminoacyl ARNt synthétase et ses tARN accepteurs est due à un nombre restreint de nucléotides, quelquefois une seule paire de bases, que l'on nomme déterminants de l'identité de l'ensemble des isoaccepteurs. La 2ème percée importante vient de la découverte de la possibilité de séparer les aminoacyl tARN synthétases en deux classes. La 3ème vient de la résolution des structures tridimensionnelles de deux cristaux de tARN avec leurs synthétases. La France occupe une très bonne place dans ce domaine. Les autres systèmes étudiés en France sont les interactions des protéines avec leur messenger dans les systèmes autocontrôlés à l'étape de traduction grâce à des conformations particulières d'ARN messenger (ex : tARN ou en pseudo-noeud).



Existe-t-il, dans les protéines reconnaissant les ARN, des motifs communs comme dans le cas des protéines reconnaissant les ADN, ceci est une question ouverte à l'heure actuelle. L'interaction de TARN messenger avec d'autres facteurs protéiques a également une importance primordiale en ce qui concerne la régulation de l'expression génétique, notamment aux étapes du démarrage et de la terminaison de la synthèse protéique.

## MÉCANISMES ET TENDANCES DE L'ÉVOLUTION

D'une manière générale, les études portant sur ces différents niveaux d'organisation sont menées de façon cloisonnée, et, dans de nombreux domaines, *l'intégration des échelles* est loin d'être réalisée; en particulier, certaines découvertes récentes concernant la plasticité du génome et ses relations avec l'adaptation des organismes sont encore mal assimilées dans les raisonnements et les concepts,

Il est nécessaire, pour pouvoir appréhender l'ensemble des processus génétiques et comprendre les relations entre la plasticité du génome et l'adaptation des populations, de focaliser les recherches sur des modèles génétiques où fonctions et causalités sont accessibles à l'analyse et à l'expérimentation.

Une question clé concerne les rapports entre la plasticité du génome et l'environnement. Celui-ci peut-il influencer sur la production de la variabilité génétique ? De nombreux faits suggèrent que la réponse soit positive, et il serait nécessaire d'analyser comment les facteurs environnementaux affectent les mécanismes produisant la variabilité génique (mutations, transpositions, amplifications, *crossing-over*...). Existe-t-il un mécanisme cellulaire qui ferait le pont entre les variations du génome et les stimuli extérieurs chez les organismes supérieurs ? (Chez les bactéries, le système SOS répond en partie à cet objectif).

## Génome, populations et espèces

### Coopération des différents génomes d'une cellule

Les événements et les mécanismes endosymbiotiques ayant abouti à l'acquisition des organites (plastides, mitochondries) par des cellules eukaryotiques sont encore très peu documentés. Ces événements ont généré des organismes contenant deux génomes différents (cellules animales) et trois - voire quatre - génomes différents chez les plantes. En effet, les plastides de certaines algues proviennent d'endosymbioses tertiaires : dans ces cellules coexistent de manière intégrée le génome eukaryote (noyau) de la cellule hôte actuelle, le génome réduit de la cellule endosymbionte (nudéomorphe), le génome d'origine prokaryotique mitochondrial, le génome d'origine prokaryotique des plastides de l'endosymbionte. Certains gènes sont passés en cascade d'un génome dans l'autre, mais les modalités de ces transferts ne sont pas encore connues.

La compréhension de ces phénomènes d'intégration et de coordination d'expression des différents éléments du génome demande que soient poursuivies et soutenues les recherches permettant d'expliquer comment ils ont coévolué et comment s'équilibrent et se substituent les informations provenant des différents compartiments cellulaires, notamment par l'étude du fonctionnement des populations naturelles qui permet d'appréhender comment des gènes différents interagissent et apparaissent coadaptés (notion de "*système génétique*").

### Génome et adaptation

Les approches privilégiées sont celles qui concernent l'adaptation aux stress environnementaux naturels ou accidentels. Cela inclut les phénomènes de tolérance ou de résistance à des produits toxiques ou xénobiotiques, l'adaptation aux modifications de l'environnement (sécheresse, froid, lumière, température, etc...), les phénomènes de résistance aux parasites.

Chez les végétaux, de nombreux mécanismes originaux d'adaptation à ces modifications se sont mis en place au cours de l'évolution. De ce fait, l'étude de la biologie des stress dans le domaine végétal constitue un modèle de choix pour l'étude de la perception des signaux de l'environnement, et leur conversion en événements moléculaires responsables de phénomènes adaptatifs. Actuellement les problématiques concernent principalement l'étude des mécanismes d'adaptation à la sécheresse, d'acclimatation au froid et de résistance aux métaux lourds. Les voies de biosynthèse et de réponse aux phytohormones, ainsi que l'identification de nouvelles cibles moléculaires, sont au centre de la recherche dans ce domaine. Comprendre ces mécanismes devrait permettre de mieux maîtriser l'adaptation des plantes aux conditions défavorables : sécheresse, pollution des sols et de l'atmosphère. Cela aurait une incidence importante sur la production agricole et sur le contrôle de révolution de la flore en fonction des changements durables de l'environnement.

Chez les animaux, ce sont les adaptations comportementales, dont la génétique est en plein essor (mécanismes de reconnaissance des sexes, des hôtes, des sources de nourriture, etc.), qu'il convient maintenant d'étudier dans le cadre plus complexe de la vie de l'individu, en y associant la reproduction et l'organisation sociale, de façon à mettre en évidence l'influence des performances individuelles sur la fréquence des gènes dans la descendance. Dans cette problématique, un axe supplémentaire est en train de se développer : l'analyse comparée du traitement de l'information dans différents groupes d'animaux, qui cherche à mettre en évidence des *relations entre niveaux de complexité de la cognition animale et niveaux physiologiques*.

### La spéciation

La connaissance des mécanismes de la spéciation, étape irréversible conduisant à la diversification du vivant, reste un thème central de l'étude de l'évolution. On peut envisager différentes approches ; identification de gènes, ou groupes de

gènes responsables soit de la stérilité des hybrides, soit de l'isolement éthologique; étude des bases génétiques des caractères morphologiques, physiologiques ou comportementaux présentant une faible variance intrapopulationnelle; comparaison des structures génomiques globales à l'aide des méthodes moléculaires; identification des systèmes génétiques responsables de la spécificité des niches écologiques. Deux phénomènes récemment découverts doivent également être pris en compte du point de vue de leur fréquence et de leur signification évolutive : d'une part l'isolement génétique lié à la présence de micro-organismes symbiotiques, d'autre part l'existence de transferts de gènes entre des espèces appartenant à des groupes très divergents.

La compréhension de ces mécanismes repose également sur le développement des recherches en génétique des populations qui visent à comprendre l'histoire, la structure et le fonctionnement des populations en réponse à la fois aux pressions sélectives de l'environnement et à des processus stochastiques (fondation, extinction), compte tenu de leur démographie et de leur écologie.

## Dynamique des écosystèmes et interactions durables

La dynamique des écosystèmes doit être abordée depuis le niveau d'organisation des individus et de leurs comportements, jusqu'à celui des interactions durables agissant au niveau des populations et des peuplements, ce qui nécessite que se développent de larges approches *pluridisciplinaires*.

### Le comportement individuel

L'intégration de l'animal dans son environnement doit être vue comme une réponse active résultant de prises d'informations multiples et de leur traitement en fonction *des* capacités sensorielles, intégratives, mnésiques et motrices. L'ensemble des mécanismes permettant à l'animal d'accéder à ces ressources doit donc être pris en compte (utilisation de l'espace, relations prédatrices-antiprédatrices, co-

opération, compétition). De manière complémentaire, l'étude des aspects fonctionnels et éco-éthologiques de ces comportements doit être développée, de façon à mieux comprendre les possibilités d'adaptation aux modifications de l'écosystème, mais également l'influence des interactions locales sur l'ensemble du système. Ceci devrait conduire à l'élaboration de modèles utilisant des lois simples (optimisation) ou plus complexes (*Unified foraging Theory*).

### **Les interactions durables**

On entend par là les "*interactions intra et interspécifiques individuelles durables*", c'est-à-dire les différents types de relations qu'ont les organismes avec des individus appartenant à la même espèce ou à des espèces différentes.

Les relations intraspécifiques dépassent fréquemment le simple processus d'échange de gènes, lié à la reproduction, ou les compétitions/coopérations occasionnelles. La survie et le développement de l'individu, ou la dissémination de ses gènes, dépendent alors du groupe, formant un système individualisé au sein de la population. Ce groupe peut présenter diverses formes d'organisation, allant du gréganisme à la société, au point de constituer la plus petite entité biologique viable de l'espèce considérée.

De même lorsque les relations interspécifiques deviennent habituelles, importantes, et parfois obligatoires pour la survie, il en résulte des associations dont la synécie, le commensalisme et la phorésie, le mutualisme, le parasitoïdisme, le parasitisme et la prédation sont les principaux types. Dans la nature, la limite entre l'un ou l'autre type est souvent floue et l'on observe toutes les formes de transition entre eux.

Ces différents types d'associations influencent les stratégies d'exploitation des ressources et de reproduction. Elles occupent dans les écosystèmes une place considérable et ont joué un rôle déterminant à toutes les étapes de l'évolution; de plus, certaines d'entre elles interviennent, parfois de ma-

nière dramatique, dans l'économie et dans la santé des collectivités humaines. Leur étude peut être appréhendée au niveau des mécanismes moléculaires, cellulaires et étho-physiologique, des structures génétiques et démographiques, de la phylogénie et des mécanismes de spéciation, de leurs modalités et de leur impact particulier dans les milieux anthropisés.

L'ensemble des mécanismes et des adaptations par lesquels ces associations répondent aux pressions du milieu en termes dynamiques, génétiques et évolutifs, constitue donc un champ d'observation et de recherche privilégié pour l'étude des modalités et des tendances de l'évolution. Leur étude comparée conduit à la modélisation des systèmes de pressions sélectives réciproques et donc à l'approche des grands problèmes de la biologie des populations (constitution des faunes, radiations, peuplements, etc.). Elle permet aussi d'aborder, par le biais de la spécificité, les problèmes de la spécialisation, de l'adaptation et plus généralement de la communication interspécifique, avec en particulier le développement récent et important de l'immunologie parasitaire. Enfin l'étude des phénomènes de coévolution (= coadaptation et (ou) cospéciation) et des radiations parasitaires permet l'utilisation des parasites comme marqueurs ou comme témoins de la phylogénie des hôtes.

### **L'apport des faunes marines**

L'étude des faunes marines présente un intérêt particulier, car les principes néo-darwiniens de la spéciation, impliquant par exemple la nécessité du flux génique réduit par isolement géographique et la sélection des individus dans une population n'y sont pas toujours facilement applicables : la mer s'est révélée un milieu plus conservateur que les milieux continentaux et, à côté de groupes dont la radiation est récente, on y rencontre des organismes très proches de leurs ancêtres du Secondaire, ou même du Primaire. L'étude des écosystèmes abyssaux associés aux régions tectoniques critiques et découverts seulement depuis une douzaine d'années permet de connaître les limites extrêmes de la vie et de découvrir de nouveaux métabolismes



énergétiques et de biosynthèse. Elle fait appel à une technologie performante (sous-marins profonds habités, robots d'observation de longue durée) pour laquelle la France détient une compétence reconnue. La connaissance des mécanismes particuliers aux micro-organismes des milieux abyssaux peut apporter une contribution importante à l'étude de l'évolution des Procaryotes : une équipe française a récemment mis en évidence, chez une de ces archéobactéries, l'existence de plasmides probablement liées au processus de détoxification.

Les organismes marins offrent, par conséquent, une gamme très variée de modèles pour l'étude des processus de dispersion, de différenciation géographique, de spéciation et de réponses aux modifications du milieu. L'étude analytique des faunes auxquelles ils appartiennent en fonction des transformations tectoniques et des fluctuations hydroclimatiques peut enrichir le débat entre macroévolutionnistes et néo-darwiniens.

### ***Les stratégies de reproduction***

L'étude des systèmes de reproduction, en relation avec celle des stratégies démographiques, représente également un champ d'étude insuffisamment exploré, et jusqu'ici surtout étudié chez les plantes, où de nombreuses espèces hermaphrodites ont mis en place des mécanismes *empêchant l'autofécondation* (stérilité mâle, par exemple). Dans le règne animal, les *stratégies permettant l'autofécondation*, comme par exemple les parthénogenèses, ont souvent été considérées comme des impasses évolutives. Elles sont pourtant très répandues et ont été généralisées dans des groupes comme les hyménoptères, certains nématodes et de nombreux acariens. Il apparaît aujourd'hui que, dans certaines conditions, la possibilité de réaliser l'autofécondation constitue un avantage particulier dans les populations morcelées, à faible chance de rencontre des sexes, chez lesquelles elle augmente les chances de fondation d'une colonie.

Un aspect important de l'évolution des stratégies de reproduction concerne le rôle des mécanismes non nucléaires pouvant influencer sur la déter-

mination du sexe. On sait, depuis de nombreuses années, qu'ils existent chez les plantes; mais la découverte (ou la redécouverte) chez les animaux de protozoaires symbiotiques capables de modifier les systèmes de reproduction est récente : incompatibilités cytoplasmiques chez les diptères, modification du sexe chez les cloportes par des rickettsies symbiotiques.

L'étude des stratégies sexuelles comme réponse à des contraintes de dispersion et de rencontre des sexes mériterait donc d'être développée, en relation avec la génétique des populations et par la comparaison des modèles équivalents rencontrés dans différents groupes animaux et végétaux,

### ***la co-évolution des sociétés humaines et des organismes***

Selon les circonstances, les sociétés humaines sont destructrices ou créatrices de diversité. Pendant des millions d'années, ces interventions n'ont pas dépassé le cadre des phénomènes de coévolution. Depuis 10 000 ans environ, leur impact s'accroît progressivement, soit directement par le processus de domestication, actuellement relayé par les biotechnologies, soit indirectement par des modifications du milieu. Cet impact se manifeste :

- *sur les organismes*, à travers le processus de domestication, souvent associé à des pratiques culturelles, qui peut être créateur de diversité, mais peut aussi entraîner une érosion génétique (les pratiques de sélection, de commercialisation, les biotechnologies, risquent de faire disparaître des variétés ou des races correspondant à des contextes particuliers);

- *sur les populations sauvages*, à travers la destruction des "nuisibles" qui modifie la chaîne trophique, ou par des prélèvements trop importants dans certaines populations;

- *indirectement* par les modifications des milieux liées aux pratiques agricoles et pastorales; à travers la gestion des espèces protégées, ou favorisées (agroforesterie, gestion des "parcs à gibiers");

par l'introduction d'espèces exogènes, mise en compétition avec les espèces locales; dans tous les cas, lorsque l'homme cesse d'intervenir sur un territoire, du fait de la prolifération de quelques espèces pionnières.

Les paléontologues et les préhistoriens ont, jusqu'ici, surtout étudié l'influence des milieux naturels sur l'apparition de l'homme et sur le fonctionnement de ses sociétés. Il paraît maintenant essentiel de comprendre *comment le développement des sociétés humaines influe sur le devenir des êtres vivants et des milieux* et, en particulier, sur quels mécanismes biologiques elles ont agi pour contrôler la reproduction des plantes et des animaux de façon à répondre à leurs besoins; ceux-ci ne correspondent pas uniquement à la couverture de besoins physiologiques, mais s'inscrivent à l'intérieur de pratiques socio-culturelles.

## L'INTERFACE BIOSPHERE-LITHOSPHERE

### Les apports de la paléontologie

Seule la paléontologie peut donner un cadre chronologique aux scénarios proposés par les autres biologistes, qui ne disposent, que d'informations purement synchroniques. Son apport au niveau de l'étude des peuplements floristiques et faunistiques, de l'histoire des variations climatiques et de l'étude de la structure des communautés biologiques, est irremplaçable et peut à la fois permettre de réinterpréter nombre de phénomènes évolutifs et d'établir une étude prospective des changements actuels. Or, au moment où des controverses, bénéfiques pour les sciences de l'évolution, se multiplient du fait de la confrontation des données moléculaires et paléontologiques (relations de parenté, horloges moléculaires, vitesse d'évolution, nature des branchements, biogéographie, etc.), l'une des disciplines voit s'accroître exponentiellement les résultats à interpréter, tandis que l'autre, faute de moyens, ne peut accéder à l'acquisition de données nouvelles. La commu-

nauté paléontologique française est la plus importante d'Europe, mais ses champs de recherche se restreignent faute du financement de programmes spécifiques.

### La taphonomie

La taphonomie étudie les processus de concentration et d'altération qui interviennent depuis la mort d'un animal, ou d'un groupe d'animaux, jusqu'à ce qu'on les retrouve dans un site fossilifère. Elle permet la transition entre individus, populations ou biocénoses, de la biosphère et de la lithosphère. Par comparaison avec des échantillons équivalents actuels, elle permet d'évaluer l'importance des altérations liées au processus de fossilisation. On dispose ainsi d'une méthode permettant d'étudier à la fois les phénomènes de conservation différentielle spécifique intervenant dans les extinctions massives et l'évolution de la diversité des organismes au cours des temps. Il est également possible de distinguer les changements faunistiques *dus* au mode de concentration des os, de ceux réellement liés à des fluctuations climatiques ou à des mouvements tectoniques, et donc, d'apporter une *aide à l'interprétation des paléoenvironnements*.

### L'évolution chimique

Commencée dans les années 1950, l'étude de révolution chimique a fait des progrès considérables ces dernières années, voire ces derniers mois. On peut aujourd'hui, par souci de clarté, la subdiviser en trois phases : *évolution moléculaire, macromoléculaire et supra-moléculaire*.

En ce qui concerne l'*évolution moléculaire*, on sait aujourd'hui, à partir des molécules initiales ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , etc.) obtenir en un minimum d'étapes et avec sélectivité : la plupart des acides aminés et des sucres naturels, les bases puriques et pyrimidiques, atteindre la famille des uroporphyrinoïdes. Si l'on y ajoute des éléments sur la synthèse des molécules de compartimentation, on voit se

dessiner, exploser même ces derniers mois, des bases très solides pour un développement de l'ex "soi-disant" chimie prébiotique. Caractériser de telles suites réactionnelles, c'est aussi comprendre les relations structurelles, jusqu'ici inexpliquées, entre les biomolécules d'aujourd'hui et un choix limité de petites molécules inductrices.

Les étapes suivantes d'oligomérisation (*évolution macromoléculaire*) sont également abordées par les chimistes de façon active. Certains peptides ainsi obtenus se sont avérés, dans le domaine de la catalyse, d'excellents précurseurs de l'activité enzymatique. Des travaux portants sur la créations des chaînes d'ADN ou ARN montrent que seuls, pour des raisons de conformation, les sucres en C<sub>5</sub> sont capables de donner des chaînes hélicoïdales capables de se dupliquer (linéaires pour le C<sub>6</sub>), ce qui pourrait expliquer l'exclusion de tous autres sucres que les pentoses dans la constitution des doubles hélices. Les questions liées à la préséance protéines, ARN, ADN sont l'objets de débats

La dernière phase d'auto-association non covalente que l'on peut qualifier *d'évolution supramoléculaire* est également activement étudiée. Des structures planes, discoïdes, ou en hélice, sont obtenues.

Dans chacun de ces trois domaines, en ne faisant intervenir que les facteurs physico-chimiques classiques (thermodynamique, cinétique, de conformation), les chimistes expliquent les sélectivités moléculaires considérables quelquefois obtenues. Est également recherchée l'existence de systèmes évolutifs au niveau des événements marins, des structures cométaires et météoritiques. Les atmosphères planétaires sont étudiées en tant que modèles en cours d'évolution, de même que sont évaluées des surfaces minérales en tant que macromolécules informatives. Ainsi, si l'évolution chimique vers le premier système vivant a dû passer par le trou d'aiguille de la sélection moléculaire, et si cette sélection n'a vraisemblablement pu être que progressive, il apparaît néanmoins que les conditions naturelles d'apparition d'un premier système vivant sur cette terre n'ont pu utiliser qu'un petit nombre de molé-

cules initiales inductrices (HCN, aminonitriles...), vu la nature du réacteur et les conditions opératoires. Les voies de recherche paraissent, néanmoins, désormais ouvertes pour décrypter le mécanisme du premier assemblage capable de se reproduire (donc vivant). Le chimiste possède de plus aujourd'hui un choix infiniment plus grand que les molécules initiales, ainsi que le choix des conditions opératoires. En conséquence, la création, à terme, d'autres systèmes auto-reproductibles ne doit pas être considérée comme une pure utopie.

## LA TAXINOMIE MODERNE

Pour l'analyse de la biodiversité, comme pour l'étude de l'évolution, la systématique représente *un préalable et un aboutissement*.

*Un préalable* parce qu'il n'est pas possible d'imaginer de façon crédible un champ de recherche où l'on puisse se passer d'une diagnose exacte des taxons étudiés; une étude d'impact sur un écosystème dont on est incapable d'identifier les composantes; un développement biotechnologique, aboutissant éventuellement au dépôt d'un brevet, réalisé à partir d'un matériel vivant indéfini.

*Un aboutissement* parce qu'une systématique vivante représente la synthèse des connaissances acquises sur un taxon à un moment donné : elle doit incorporer les résultats que les progrès réalisés dans toutes les disciplines mettent à la disposition du chercheur.

La systématique évolutive connaît depuis une vingtaine d'années un renouveau méthodologique profond avec, par exemple, l'utilisation des techniques d'évaluation de la ressemblance, de reconstitution de phylogénèses, de recherche des relations entre aires d'endémisme. Plus récemment apparue, l'analyse de forme est en train de renouveler complètement la morphométrie multivariable classique et ouvre l'accès à une analyse approfondie du phénotype. Ces développements ont été facilités par l'essor de l'informatique.



## Morphométrie géométrique et analyse de forme

Le renouveau des apports de la morphométrie en biologie, est lié en grande partie aux travaux interdisciplinaires développés aux Etats-Unis (Michigan Museum, American Museum de New-York, Stony Brook) et en Suède (Université d'Uppsala), et s'est traduit par des innovations conceptuelles et méthodologiques, elles-mêmes catalysées par l'informatisation de la prise des mesures, qui diminue le temps de saisie tout en améliorant sa précision. Par l'utilisation de décomposition paramétrique de contours (analyse de Fourier, axes médians, courbes de Bézier), plus récemment par l'analyse de repères fixes (*Landmark analysis*, ajustement non paramétrique, superposition et analyse des déformations), *ces méthodes permettent de traiter l'organisme comme un tout, et non comme une simple collection de distances.* .

Au-delà de leur intérêt descriptif, ces techniques sont susceptibles d'être employées pour l'étude de l'ontogenèse, de la morphogenèse et de l'hétérochronie. En particulier, celles qui utilisent des points homologues débouchent sur l'analyse des changements de forme et sur la mise au point de modèles de transformation, qui peuvent permettre d'aider à séparer homologies et homoplasies et à révéler des caractères cryptiques dans les lignées évolutives. Elles peuvent, de plus, puissamment contribuer à l'élaboration de bases de données systématiques, permettant des déterminations assistées, par la reconnaissance automatique des formes. Enfin, outre leur apport à la biologie évolutive, elles intéressent aussi l'anatomie comparée dans ses approches fonctionnelles.

Leur évaluation dans ces différents contextes, ainsi que leur développement (généralisations tridimensionnelles, emploi en discrimination, etc.) représente une tâche urgente dans laquelle la collaboration des biologistes, des informaticiens et des biométriciens devrait être encouragée et soutenue.

## La "phylogénétique" : une nouvelle discipline

reconstruction des phylogenèses et la modélisation des phénomènes évolutifs permettent de tirer partie de l'accumulation des informations concernant l'organisation et la variabilité génomique et phénotypique, pour mieux comprendre les mécanismes évolutifs qui sont à l'origine de la diversité des organismes. *L'approche évolutive phylogénétique fait appel à des données taxinomiques comparatives, ayant une composante historique*, et issues de la paléontologie, de la botanique, de la zoologie et de la microbiologie. Elle s'appuie sur l'analyse de caractères informationnels variés : morphologiques (quantitatifs et qualitatifs), physiologiques, éthologiques, embryologiques, écologiques, bio et paléobiogéographiques. Elle utilise également les résultats de différents types d'étude de l'ADN (total, nucléaire, chloroplastique, mitochondrial). Elle oblige à reconsidérer en détail les données publiées, à réunir un corpus de données originales nouvelles et elle est devenue usuelle pour une nouvelle génération de chercheurs.

L'analyse phylogénétique procède de différentes méthodologies que Ton peut rapporter à trois types principaux : l'analyse de distance (phénétique); l'analyse de parcimonie (cladistique); l'analyse de maximum de vraisemblance (probabiliste). Elles ont conduit à la mise à disposition récente de différents logiciels. Cette première phase s'est essentiellement déroulée aux Etats-Unis, où certains périodiques sont presque exclusivement consacrés à la méthodologie de cette discipline en émergence, qui est en train de devenir "*la phylogénétique*". Non soutenue, la recherche française, malgré les efforts menés par les pionniers du Muséum, n'a produit que fort peu de contributions dans ce domaine (les premières analyses cladistiques conséquentes publiées en français ne datent que du début des années 80), Elle reste pour le moment en retard et, en ce qui concerne les logiciels, totalement tributaire de l'étranger.

## La biogéographie historique

La biogéographie historique est l'*analyse des relations entre la structure et l'histoire des peuplements d'une part, et l'histoire géologique de la surface du globe, d'autre part*. D'abord fondée sur une systématique "*intuitive*", une géographie fixe et le modèle "*centre d'origine-dispersion*", elle a connu sa révolution dans les années 60 avec l'apparition synchrone de la systématique phylogénétique et de la tectonique des plaques. Sa tendance actuelle est de rechercher, non plus l'histoire particulière des taxa, mais les relations de parenté existant entre les aires d'endémisme. La biogéographie historique et la biogéographie écologique, qui cherchent à décrire comment les faunes et les flores se sont mises en place, peuvent fournir des modèles prédictifs en ce qui concerne les conséquences des modifications de l'environnement sur l'avenir des biomes actuels; elles peuvent jouer ainsi un rôle fondamental dans la détermination des aires géographiques à protéger en priorité.

## RENCONTRES POSSIBLES ENTRE DISCIPLINES

- Avec l'écologie : étude de l'évolution des populations dans des conditions naturelles, et(ou) en fonction de l'influence de l'homme,

- Avec les sciences du comportement et les neuro-sciences : étude évolutive et adaptative des comportements, processus cognitifs.

- Avec l'informatique : affinages des méthodologies spécifiques à l'étude de révolution; gestion des banques de données biologiques; création d'outils nouveaux (intelligence artificielle, combinatoire).

- Avec la chimie et la biochimie : évolution chimique; origine et évolution du code génétique;

étude des génomes fossiles; approche moléculaire de la biodiversité et de la phylogénèse.

- Avec la géologie : biogéographie historique; reconstitution des paléoenvironnements (paléontologie, palynologie, paléoécologie, paléoclimatologie, géochimie, taphonomie).

- Avec les mathématiques : modélisation et simulation, théorie des codes, analyse d'image et de forme, morphologie mathématique.

- Avec les sciences humaines : interventions des sociétés humaines sur les génomes animaux et végétaux; domestication, manipulations transgéniques etc.; rapports homme-nature; aspects épistémologiques de l'évolution.

- Avec la pharmacologie : espèces à pouvoir pharmacologique.

## PROPOSITIONS, PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

L'évaluation et la remise en question des thèmes prioritaires de la recherche en biologie, qui se poursuit depuis une dizaine d'années, doit impérativement déboucher sur une politique scientifique qui redonne toute sa valeur à l'initiative et à l'inventivité des chercheurs. Dans le domaine de la recherche fondamentale, il faut savoir *s'inscrire dans la durée*, faire preuve d'audace et renoncer à exiger de connaître à l'avance et en détail, ce que va rapporter un investissement. Les biologistes ont à présent besoin d'un véritable projet à long terme, dans lequel tous trouvent leur juste place et vis-à-vis duquel ils se sentent partie prenante. Cela rend indispensable que soit pris en considération *l'équilibre entre les disciplines concernées*. Il est donc important de veiller à ce que les recherches se développent simultanément et harmonieusement, à tous

les niveaux d'organisation du vivant, sans se laisser détourner des objectifs fondamentaux au hasard des modes.

## L'INTÉGRATION DES ÉCHELLES

Le décloisonneraient des études portant sur les différents niveaux d'organisation de la biodiversité est une nécessité. Sa réalisation pourrait permettre de mettre en place une véritable interdisciplinarité notamment dans le domaine : *de la reconstitution des phylogénèses et de la modélisation des phénomènes évolutifs* par l'utilisation et la confrontation des résultats obtenus à partir de données, paléontologiques ou néontologiques, acquises à différents niveaux d'intégration (moléculaire, cellulaire, de l'organisme); *de la morphologie fonctionnelle envisagée dans une optique évolutive* (relations structure-fonction, compréhension des mécanismes contrôlant l'évolution des caractères, du génome à l'organisme).

Pour quelques groupes, de vertébrés et d'invertébrés, l'analyse de la diversité, appréhendée simultanément au niveau morphologique et au niveau moléculaire, montre des divergences et des pouvoirs de résolution variables, annonçant au-delà de ces contradictions apparentes de fructueuses comparaisons. Toutefois, les résultats parfois spectaculaires obtenus par le séquençage des acides nucléiques ne doivent pas masquer les réels problèmes soulevés par l'utilisation des données moléculaires en phylogénie. Ainsi en est-il des taux d'évolution (horloge moléculaire), de l'importance des mutations neutres ou du rôle des contraintes intrinsèques, du rapport informations/bruit/longueur de séquence, de la gestion des homoplasies et des relations entre phylogénie des fonctions et phylogénie des taxons. Autant de questions que les utilisateurs phylogénéticiens ont, pour le moment, le plus souvent éludées.

Quelle que soit la réponse à ces questions fondamentales, elle ne pourra être apportée que

par la comparaison des données moléculaires et morphologiques, dont on peut prévoir qu'elle va devenir *un des thèmes majeurs d'étude dans les années à venir*. Ce thème nécessite une importante réflexion méthodologique, la conception d'outils nouveaux ou l'adaptation d'outils existants à des problématiques spécifiques et la formation d'équipes rassemblant paléontologistes, paléogéographes, paléoécologistes, botanistes, zoologistes, éthologistes, géologues, généticiens moléculaires, mathématiciens et informaticiens. Les hommes et les savoir-faire existent actuellement en France : il ne reste qu'à favoriser leur synergie.

## LES OUTILS DE LA RECHERCHE

### Modélisation phylogénétique

Ce champ est maintenant ouvert à des recherches plus approfondies afin d'élaborer les algorithmes à la fois puissants, consistants, robustes et testables, permettant de résoudre, au niveau des structures (*pattern*) aussi bien que des mécanismes (*process*), un certain nombre de problèmes actuellement sans solution. Notamment :

- comment coder des séries de transformation linéaires ou non-linéaires, particulièrement dans le domaine morphologique ou l'information n'est pas stéréotypée, comme elle l'est dans le domaine moléculaire ?

- par quelle méthode peut-on comparer différents arbres phylogénétiques, ou déterminer leur degré de congruence ?

- comment déceler la présence de transferts géniques, ou estimer les taux de mélange, dans les phylogénèses {évolution réticulée} ?

- comment prendre en compte les phénomènes d'évolution concertée, dans la reconstruction des phylogénèses ?



- comment modéliser la dynamique des séquences répétées au niveau intra et inter-génomique, et en tirer des informations phylogénétiques ?

- comment tester les variations de la vitesse d'évolution et détecter l'existence éventuelle d'équilibres ponctués ?

- comment intégrer les informations sur la répartition spatiale actuelle et fossile de la diversité génétique, aux informations de nature évolutive ?

Le besoin se fait donc sentir de la création d'une structure, regroupant des biologistes (généticiens, morphologistes et paléontologues) et des théoriciens (mathématiciens et informaticiens), et permettant de dynamiser les énergies. Une telle structure devrait disposer de *moyens informatiques puissants* et d'un *accès facilité aux banques de données*.

## Les bases de données biologiques

Les bases de données biologiques spécialisées représenteront clairement *un enjeu commercial important* à partir du milieu de la décennie. Les pays qui auront su les créer, les organiser et former les experts capables de les maintenir à jour et de les exploiter, deviendront prestataires de service vis-à-vis des nations qui n'auront pas su se doter de tels outils. Il est hautement souhaitable que, très rapidement, des éditeurs français ou européens soient associés à la création et surtout à la diffusion de telles bases : faunes, flores, génomes, atlas anatomiques intelligents, structures de macromolécules biologiques, etc., déjà réalisés par d'autres pays européens.

Un problème crucial est de réussir à assurer la complémentarité entre un ou des centres, gérant de grandes banques et de vastes programmathèques, et les stations de travail localisées à distance dans des laboratoires ne disposant que d'une faible compétence informatique. La communication et les recherches faites dans ce domaine seraient puissamment favorisées par la création de réseaux câblés et

par un effort substantiel en vue d'équiper les laboratoires de biologie en matériels informatiques conséquents.

## Les banques de matériels

Il est nécessaire et urgent de reprendre les *inventaires* en définissant les zones prioritaires (celles les plus menacées), en coordonnant au niveau international, des *collectes méthodiques* et en promouvant les dispositions légales établissant le résultat de *ces* collectes comme *une part inaliénable du patrimoine mondial*; sinon les pays suffisamment riches et bien inspirés pour avoir stocké un grand nombre d'échantillons biologiques, jouiront dans le futur proche d'une *position de monopole* qui leur permettra de *régenter tous* les domaines de recherche et de production faisant appel à ces matériels.

L'importance de ces collections déborde très largement du domaine de la recherche scientifique pour se situer, au plan économique et politique, dans le cadre général des relations Nord-Sud. Les préoccupations *"environnementales"* du Nord, où se trouvent les principaux utilisateurs de la biodiversité, sont largement liées au maintien, à l'utilisation et surtout au contrôle des ressources génétiques : de grandes firmes multinationales (Glaxo, Novo Industry, Merck) ont d'ores et déjà signé des accords bilatéraux avec des pays du Sud, comme le Costa Rica, le Ghana et le Nigeria, dans le but de constituer des banques de gènes. L'accès à ces ressources, donc une part très importante se trouve située au Sud, et dont l'exploitation dans le domaine médical, agricole, agro-alimentaire et énergétique, va croître tout au long du XXI<sup>ème</sup> siècle, pose dès maintenant le délicat problème de leur propriété. Le développement d'une branche nouvelle du droit international en résultera, dont l'élaboration et l'application ne pourront se faire sans le concours de biosystématiciens-experts.

Il est également important d'organiser les banques de matériels que la France possède déjà,

mais qu'elle ne s'est jamais donné les moyens d'exploiter pleinement; si un réel effort d'organisation n'est pas fait dans ce domaine avant que les spécialistes capables d'en retranscrire toute l'information aient disparu, ces collections, qui sont *une part irremplaçable du patrimoine mondial*, s'en trouveront définitivement dévaluées; il est à craindre qu'elles ne soient un jour acquises à bas prix par des pays à la politique scientifique plus ambitieuse.

## Les stations de terrain

Dans ce domaine la France, seule des pays scientifiquement développés à posséder des territoires dans toutes les mers du globe et en Amazonie, a un atout important à jouer. Le réseau d'influence culturelle et économique qu'elle a su conserver dans de nombreux pays du Sud, lui donne d'autre part d'importantes possibilités. Encore faut-il les exploiter.

Les forêts équatoriales dans leur ensemble, les territoires antarctiques et la Nouvelle-Calédonie présentent un intérêt scientifique considérable. Alors que de nombreux pays équatoriaux n'ont pas toujours la volonté, ou la possibilité, d'étudier les écosystèmes forestiers avant leur destruction, la Guyane, par son originalité géographique et climatique et son environnement biologique, représente pour les scientifiques du monde entier un champ de recherche exceptionnel. Son étude pourrait être confié à un "Centre de Recherche en Biologie Equatoriale", en association avec les organismes de recherche qui y sont déjà implantés. Un tel centre pourrait être ouvert à tous les chercheurs européens intéressés par l'étude de la biodiversité et de l'évolution.

## CONCLUSIONS

Il faut souligner :

- l'importance dans les prochaines années, du développement de projets européens, dans lesquels la France développerait mieux ses propres atouts, et pourrait, dans certains domaines, jouer un rôle de leader;

- l'importance de la formation et la véritable chance qu'a la pluridisciplinarité de se développer lorsqu'elle s'adresse aux jeunes chercheurs.

## EVOLUTION

- Un des thèmes importants des années à venir est la *confrontation des données moléculaires et non moléculaires* dans différents groupes animaux et végétaux; quelle que soit la problématique (reconstitution des phylogénèses, génétique des populations, mécanismes de la spéciation, relations inter et intra-spécifiques, etc.), c'est là que l'instrument d'investigation Fantastique que constitue la connaissance détaillée de la mécanique biochimique peut donner toute sa mesure, une fois établies et fixées les limites des approches nouvelles, et en utilisant toute la puissance des méthodes modernes d'analyse pour inventorier, critiquer et réorganiser la masse des connaissances accumulées par des générations de naturalistes.

- Dans le domaine de la *biologie des populations*, un effort doit être fait en France dans l'étude de la sélection de parentèle, de la théorie des flux géniques et des associations et déséquilibres entre gènes.

- La systématique a été à l'origine de l'idée de révolution. La réduction drastique des moyens qui lui sont attribués intervient au moment même où elle s'est enfin dotée des concepts, des méthodes et des outils qui lui permettent d'apporter une contribution fondamentale à son étude. Le CNRS et les autres organismes de tutelle doivent prendre en

considération les directives de l'IUBS et réfléchir ensemble aux moyens permettant de financer *la maintenance et l'enrichissement des banques de matériels biologiques*, ainsi que des recherches qui y sont associées; en particulier, en maintenant un effectif suffisant de *systematiciens-experts* pour que l'impossibilité d'identifier tel ou tel matériel ne devienne pas un facteur limitant au travail d'autres biologistes; il est clair que cette réflexion doit être menée de concert avec l'ensemble des pays ayant une tradition dans ce domaine; le CNRS est, d'autre part, certainement Tendra où Ton peut réfléchir sur *le rôle des banques de matériels et sur les aspects juridiques et éthiques soulevés par leur gestion*,

- Dans beaucoup de domaines, les bases de données et les bases de connaissance sont insuffisantes et insuffisamment organisées en France. Là également, le CNRS et les autres organismes de tutelle doivent se concerter. La France et l'Europe doivent être partie prenante dans la conception, l'organisation et la gestion de ces bases, au plan mondial,

- Un travail de rapprochement entre mathématiciens, éditeurs de logiciel et biologistes devrait être encouragé. Les biologistes ont dans ce domaine des besoins spécifiques. En retours, la modélisation de la démarche intellectuelle des biologistes, la modélisation des réseaux neuronaux, les problèmes de classification et de représentation de connaissance biologiques complexes, fourniraient des thèmes fructueux de recherche en informatique,

- L'étude des modèles chimiques de l'origine des choses biologiques peut et doit dorénavant faire partie d'une thématique forte de la chimie organique et, à ce titre, être encouragée. Les voies de recherche paraissent désormais ouvertes pour décrypter le mécanisme du premier assemblage capable de se reproduire (donc vivant).

## CONNAISSANCE DU GÉNOME

- Favoriser les études sur les acides ribonucléiques qui sont en retard sur les études sur

l'ADN, notamment les relations entre structure et fonction.

- Renforcer les études structurales à haute résolution : cristallographie des protéines, des complexes acide nucléique - protéine. Structure 3D en solution par résonance magnétique nucléaire,

- Rationaliser et accélérer les aller-retour : Structure  $\Leftrightarrow$  Fonction. Intégrer la mutagenèse dirigée dans les études structurales. Obtenir des mesures plus précises des performances fonctionnelles des systèmes in vivo.

- Mieux comprendre la dynamique de déformation et l'énergétique des transconformations des acides nucléiques. Thermodynamique statistique. Modes normaux de déformation des polymères, Rôle du solvant,

- A l'interface entre génétique et structure, savoir prédire plus efficacement : les domaines de repliement indépendants des protéines, leur constitution en modules, leur stabilité.

- Intégrer pleinement l'analyse des homologies entre séquences d'acides nucléiques (ou de protéines). Repérer dans les séquences homologues des motifs ayant une signification fonctionnelle.

- Introduire la dimension "temps". Améliorer les techniques cinétiques. Techniques classiques (cinétique structurale). Visualisation des mouvements des organelles. Formulation de modèles pour le couplage mécano-chimique

- Développer une véritable collaboration industrielle afin que la France ne soit pas totalement absente de l'instrumentation nécessaire à ces projets.

- Participer à l'établissement d'une carte génétique et physique à haute résolution du génome humain et des génomes d'organismes modèles (souris, rat).

**Jean-Pierre Hugot**  
Président du groupe 17



# 18

## DE LA CELLULE AUX STRUCTURES INTEGREES DES ORGANISMES

### LE CHAMP ET SES ENJEUX

#### 1 - INTRODUCTION : INTÉGRATION ET DIVERSITÉ

Un des problèmes fondamentaux de la biologie est le fait qu'il se développe à partir d'une cellule unique, l'œuf fécondé, un organisme complexe, doué de propriétés globales irréductibles à celles de ses constituants élémentaires. A partir de cette simple constatation, les recherches couvertes par notre domaine s'articulent autour de quelques grands axes :

- Un premier niveau d'investigation est celui des unités élémentaires que constituent les cellules. Celles-ci sont à leur tour de petits systèmes plus ou moins autonomes, issus de l'assemblage de molécules très diverses, avec une organisation fonctionnelle impliquant, comme dans un organisme, spécialisation des tâches et communication interne,

- L'étape suivante, celle de la biologie du développement, concerne le déroulement des processus qui vont donner naissance, à partir d'une

cellule initiale et par conséquent d'un patrimoine génétique unique, à des ensembles cellulaires différenciés et organisés. Ce domaine connaît depuis peu un essor très rapide, grâce aux apports convergents de la génétique et de la connaissance des systèmes de communication de l'organisme adulte.

- Dans ce dernier, la diversification fonctionnelle en organes et tissus possède une contrepartie, celle de nécessiter le maintien de la cohésion. L'intégration est assurée par une organisation d'échange et de traitement de messages, avec des modalités diverses suivant la complexité de l'information et les distances à parcourir : système nerveux et neuroendocrinien, hormones, substances paracrines, molécules de contact.

- Un deuxième facteur de cohésion résulte des menaces permanentes d'invasion de l'organisme par des virus et micro-organismes pathogènes. L'identification d'un agresseur après qu'il ait pénétré au sein de l'organisme implique en effet la reconnaissance du soi et du non-soi. Celle-ci repose sur une propriété fondamentale de tout organisme ; l'uniformité du patrimoine génétique de ses cellules. Elle met en œuvre un système de défenses immunitaires, distinct du système précédent, mais lié à ce dernier par de multiples interactions et faisant appel à des mécanismes de signalisation similaires.

- L'organisme comme la cellule doit satisfaire aux lois de la thermodynamique. Comme l'a montré Prigogine, le maintien de structures éloignées de l'équilibre n'est possible qu'au prix d'une dépense continue d'énergie. Pour les systèmes biologiques, celle-ci se traduit en flux d'aliments, de comburant (oxygène), de déchets et de flux associés d'eau et d'ions, à échanger avec le milieu. Il en résulte une troisième structure d'intégration, caractérisée par le développement de systèmes de transport internes, interfaces avec des échangeurs périphériques.

- Enfin, l'acquisition des aliments, la défense contre les prédateurs, les interactions avec les congénères (reproduction) comme la réponse aux contraintes physiques de l'environnement (migrations), placent les fonctions de relation au rang des propriétés intégratives majeures des organismes. Elles mettent en jeu la motricité, mais surtout les fonctions cognitives, chargées de l'acquisition et du traitement des informations multiples que reçoit un organisme.

Sous cette unité générale d'organisation se cache une autre propriété d'ensemble, celle de **la diversité**. Celle-ci se retrouve à chacun des niveaux que nous avons évoqués : moléculaire (gènes, protéines immunitaires), cellulaire ou organismique. Elle est la clé de l'adaptabilité du vivant, face aux agressions comme aux contraintes ou aux transformations du milieu.

## 2 - ENJEUX SCIENTIFIQUES

Nous présenterons plus loin un choix d'axes de recherche que la convergence des intérêts intellectuels ou sociaux et des possibilités expérimentales nouvelles rend plus particulièrement attrayants. Voici tout d'abord quelques traits marquants de révolution en cours.

### L'explosion des approches moléculaires

Une caractéristique commune saute aux yeux lorsque Ton examine l'ensemble des disciplines

couvertes par notre domaine : l'évolution très rapide vers des approches moléculaires. Plus qu'une classique dérive réductionniste, il faut y voir avant tout la reconnaissance de l'extraordinaire éventail de possibilités ouvertes par l'introduction des méthodes de la génétique moléculaire dans des disciplines qui en paraissaient naguère bien éloignées, comme par exemple la biologie du développement. Il s'y ajoute l'impact des progrès réalisés dans le domaine de la chimie des protéines, sur le plan de leurs structures comme sur celui des méthodes d'analyse.

Ces développements ont été favorisés par la très grande conservation, à travers la diversité du monde vivant, des molécules et des mécanismes moléculaires utilisés pour une fonction donnée. Outre son intérêt évolutif, cette homogénéité a permis une convergence efficace des efforts menés dans des domaines jusque là séparés par des barrières méthodologiques.

Il est par contre quelques problèmes généraux que la communauté scientifique va devoir aborder au fond si elle veut éviter qu'ils ne deviennent tôt ou tard des entraves au progrès des sciences biologiques ou de leurs applications.

### Comment assurer un nouveau départ des approches intégratives ?

Tant qu'une proportion appréciable des biologistes qui se consacraient aux approches cellulaires, puis moléculaires, avaient eux-mêmes bénéficié d'une formation aux approches intégrées, il était peu probable qu'ils oublient que la molécule qu'ils analysaient *in vitro* faisait elle-même partie d'une cellule et d'un organisme au sein desquels s'exerce sa fonction. La succession des générations, l'attrait de la biologie moléculaire et les choix effectués au niveau des formations universitaires sont en passe de changer tout cela. Le risque est grand de voir disparaître les compétences et s'estomper les possibilités de redémarrage, alors que les secteurs situés en aval ne cessent de poser de nouveaux problèmes au niveau de l'organisme entier. Nous en

verrons des exemples au niveau des applications aux sciences de la santé, de l'agronomie et de l'environnement. De plus, il est absolument indispensable d'accompagner la multiplication des séquençages de protéines ou des caractérisations de gènes par des études permettant de déterminer le rôle de ces unités dans l'organisation fonctionnelle de la cellule, de l'organe ou de l'organisme. A ce titre, le terme de "Physiologie" demande à être réhabilité. Enfin, la pertinence des conditions utilisées pour les expérimentations *in vitro* demande à être régulièrement réexaminée, ce qui requiert un progrès parallèle des conditions réelles *in vivo*.

La réponse ne doit pas consister en la préservation d'attitudes passéistes. Des technologies nouvelles, comme la résonance magnétique nucléaire (*RMN*) ou la microdialyse, permettent de renouveler les approches *in vivo*. Chaque fois que possible, il faudra soutenir des initiatives originales appuyées sur des méthodes nouvelles et sur les progrès enregistrés aux niveaux d'organisation plus élémentaires.

## Concentration des moyens ou prise en compte de la diversité biologique

Les travaux effectués sur le rat et la souris représentent de loin la majorité absolue des travaux portant sur les Mammifères, si ce n'est sur le règne animal. L'exemple de la biologie du développement (*voir ci-dessous*) comme celui de la génétique est là pour attester l'efficacité de la convergence des efforts sur un petit nombre d'espèces bien choisies. On risque toutefois des généralisations abusives, oublieuses des spécificités des espèces retenues. Ainsi par exemple, sur le plan des régulations neuroendocriniennes de la reproduction, les ovins se distinguent des rongeurs et des primates par le fait que l'axe hypothalamo-hypophysaire est contrôlé à la fois par les variations saisonnières de la photopériode et par l'environnement social. Il ne faut pas se priver du trésor d'informations que constitue la diversité des espèces, et dont de multiples études comparatives ont illustré la richesse, depuis le niveau moléculaire jusqu'à celui des populations.

Rappelons que la diversité s'exprime également au sein de chaque espèce, par le polymorphisme génétique dont on trouvera ci-après quelques applications expérimentales.

## Préserver la diversité thématique

Si, pour de multiples raisons, il est indispensable de dégager des axes prioritaires, la variété des problèmes et des situations offerte par la Biologie est telle qu'il serait vain de croire qu'ils puissent en couvrir l'ensemble, ou même seulement la plus grande partie. Il faut aussi prévoir le jour où, comme leurs prédécesseurs, ils viendront à s'essouffler. Il est donc impératif de préserver à leurs côtés une diversité de programmes de qualité, mais de taille plus modeste, afin de constituer le vivier d'où naîtront les grands axes de demain.

Le critère primordial doit être ici celui de la qualité scientifique des animateurs et des équipes, reconnue sur le plan international, et souvent corroborée par l'existence à l'étranger de projets concurrents.

## 3 - ENJEUX ÉCONOMIQUES ET SOCIAUX

Les retombées de ce secteur des sciences biologiques intéressent de nombreux domaines :

### La santé humaine

Elle constitue un secteur privilégié d'application des recherches biologiques ; cancer, maladies cardio-vasculaires, vieillissement, réponses immunitaires, maladies génétiques, anesthésie-réanimation, conservation et transplantation d'organes.

Par exemple, les progrès dans la compréhension de la régulation de l'expression des gènes devraient déboucher sur des méthodes entièrement nouvelles de traitement des cancers : des oligonu-



cléotides anti-sens sont déjà en cours d'essais thérapeutiques pour l'inhibition de la multiplication des cellules souches chez des patients leucémiques. De même, les développements récents dans le domaine des protéines d'adhésion entre cellules laissent prévoir des applications importantes dans le traitement des maladies où elles interviennent : la métastase tumorale, les dysfonctionnements de la coagulation sanguine, les troubles de l'immunité, l'infection par les agents pathogènes. Ces études débouchent sur des médicaments, produits par biotechnologie, et dont certains sont déjà en études cliniques.

La mise au point de méthodes plus adaptées de contrôle de la fécondité humaine est la condition du développement économique pour beaucoup de populations. On sait par ailleurs que la prolifération de l'espèce humaine est un des principaux facteurs de déstabilisation de l'environnement.

La santé et le bien-être des animaux, domestiques relèvent d'approches tout à fait semblables.

## **Le secteur agricole**

C'est un autre secteur-clé d'applications de notre domaine : productions animales et végétales, forêts, chasse, pêche, aquaculture. De nouvelles techniques, celle que la transgénèse qui permet de conférer des caractères génétiques exogènes à des espèces animales ou végétales, annoncent des perspectives naguère impensables, telles que la production de substances biomédicales rares par la mamelle des vaches laitières.

Dans le domaine de la production végétale, l'évolution de la politique agricole et la prise en compte de plus en plus grande des conséquences écologiques des pratiques agronomiques modifient profondément les enjeux. La notion de qualité des produits, associée à une meilleure économie des intrants, prend le pas sur la conception productiviste ancienne. Un objectif essentiel de l'agriculture devient d'améliorer les qualités d'adaptation des végétaux aux contraintes externes, [elles que la

sécheresse et les agents pathogènes, afin de réduire, par exemple, les besoins d'irrigation ou de traitements phytosanitaires. La maîtrise de la production de génotypes nouveaux, en association ou non avec la multiplication végétative, acquiert une importance économique considérable.

A ceci il faut ajouter les besoins alimentaires résultant de l'expansion de la population du globe : celle-ci va nécessiter, selon la FAO, un doublement de la production agricole tous les 25 ans. Des pays comme la France doivent prendre en charge les recherches destinées à améliorer les espèces indigènes des pays moins favorisés.

## **L'environnement**

là aussi, les retombées à prévoir sont de première importance : réponses aux pollutions et contraintes du milieu, cycle du CO<sub>2</sub> et rejets de médiane (effet de serre), etc. Signalons l'introduction de l'observation d'espèces dites bio-indicatrices pour la surveillance de l'environnement : réponses à des pollutions, évaluation des ressources océaniques en poissons.

## **L'industrie**

Ce sont par exemple les médicaments, les carburants biologiques, les biocapteurs, mais aussi les moyens de l'adaptation de l'organisme humain à travailler dans des milieux hostiles (grandes profondeurs, espace). Parmi les secteurs nouveaux, mentionnons le développement prévisible d'anticorps à fonctions catalytiques (abzymes) à usage industriel, et la collaboration étroite qui s'instaure entre l'industrie et les neurosciences et sciences cognitives : réseaux neuronaux, intelligence artificielle, communication homme-machine.

## **Le sport**

Il est concerné notamment par l'amélioration des méthodes d'entraînement et de leur suivi.

# EVOLUTION ET TENDANCES

## 1 - LES NIVEAUX CELLULAIRE ET SUBCELLULAIRE

### Aspects moléculaires

Le fonctionnement de la cellule repose sur une organisation structurale : membrane cellulaire, noyau, organites subcellulaires spécialisés, cytosquelette. Chacun de ces sous-ensembles est à son tour constitué de molécules spécifiques, dont les caractéristiques biochimiques jouent souvent un rôle déterminant dans le fonctionnement de l'ensemble. Même lorsqu'il s'intéresse aux niveaux les plus élevés d'intégration comme les comportements, le biologiste ne peut pas se désintéresser des aspects moléculaires.

A ce titre, l'étude des cellules et structures intégrées bénéficie, comme celle des niveaux inférieurs de complexité, de la collaboration que lui apporte la chimie organique. Celle-ci se traduit d'abord sur le plan de l'instrumentation : méthodes d'analyse, dont les capacités de résolution s'améliorent sans cesse, modélisation moléculaire permettant l'étude des relations structure-activité, développement d'instruments tels que les appareils d'électrophorèse capillaire. De là, grâce au développement de la chimie supra-moléculaire, on atteint progressivement le niveau de la compréhension de mécanismes tels que les relations chimiques entre cellules (protéines d'adhésion, récepteurs) ou la constitution d'agrégats moléculaires (vésicules, ensembles d'enzymes...).

Parmi les espèces chimiques dont l'étude est indispensable à la compréhension de leurs rôles biologiques, les glycoconjugués occupent une place particulière en raison de leurs multiples fonctions. La partie glycanique (sucre) de la protéine sert en effet de signal de reconnaissance, dans des cir-

constances aussi variées que l'arrêt des leucocytes sur les lectines (récepteurs) des capillaires, la formation des nodules sur les radicelles des légumineuses, ou la reconnaissance cellulaire dans le développement embryonnaire, les mécanismes de défense immune ou de métastase (*voir ci-après*). De même, la découverte récente des protéines intracellulaires liant les acides gras ouvre une voie nouvelle pour explorer le rôle joué par les lipides dans le fonctionnement cellulaire.

### Organisation fonctionnelle de la cellule

#### Compartimentation et transports

Les cellules renferment des sous-compartiments ou organites individualisés, limités par des membranes et possédant des fonctions spécialisées : mitochondries, lysosomes, peroxysomes, cytosquelette... Les polymères de ce dernier, tels que microtubules et microfilaments, sont instables. Ceci confère aux réseaux qu'ils constituent un caractère éminemment, dynamique, et une grande souplesse d'adaptation. On retrouve ces propriétés aux niveaux des interactions du cytosquelette avec les compartiments membranaires.

Cette organisation donne lieu à un trafic intracellulaire. Par exemple, les protéines synthétisées dans le réticulum endoplasmique migrent dans des vésicules vers leurs destinations respectives : autres organites, compartiments de stockage intermédiaire ou membrane plasmique, éventuellement en vue d'exportation (exocytose). Inversement, des protéines étrangères sont incorporées elles aussi dans des vésicules pour pénétrer à travers la membrane plasmique (endocytose) et gagner des organites subcellulaires tels que les lysosomes.

Les mécanismes mis en jeu aux différentes étapes - formation des vésicules, incorporation des protéines, transport et aiguillage des vésicules, relargage du contenu, interactions avec le cytosquelette - font l'objet de travaux intensifs. Ceux-ci mettent en jeu des méthodes très diverses : biochi-

mie cellulaire, biologie moléculaire (clonage et séquençage, mutations dirigées), microscopie confocale et de fluorescence, microscopie électronique associée à l'emploi d'anticorps spécifiques, immunochimie (anticorps monoclonaux dirigés contre des protéines membranaires).

### **Mécanisme de l'exocytose**

Le mécanisme fondamental de l'exocytose est encore incompris, mais la multiplication des approches permet d'enregistrer des progrès notables. La perméabilisation des cellules (cellules chromaffines, mastocytes) par des toxines bactériennes permet l'accès au cytoplasme tout en préservant l'essentiel des fonctions; on peut ainsi atteindre les composants intracellulaires impliqués dans l'exocytose. De nouvelles protéines pouvant jouer un rôle dans l'exocytose ont été caractérisées sur le plan biochimique, notamment les protéines G, impliquées dans les phénomènes de transduction du signal, les petites protéines G impliquées dans les phénomènes de trafic intracellulaire, et les annexines qui, par leurs propriétés, pourraient jouer le rôle de protéines d'appontement ("*docking proteins*"). Les nouvelles méthodes de capacitance (électrophysiologie) ont permis de suivre la fusion membranaire, et de découvrir son étape initiale, le pore de fusion. Enfin, la génétique moléculaire a apporté des méthodes puissantes : recherche de mutants chez la levure, oligonucléotides anti-sens, surexpression de protéines.

### **tes transporteurs neuronaux**

Ces protéines, très difficiles à purifier, participent au remplissage des vésicules de sécrétion à partir du neurotransmetteur cytosolique ou recapturé dans la fente synaptique après sa libération. Les premières séquences ont été obtenues tout récemment (GABA, noradrénaline, dopamine, sérotonine). La parenté très poussée entre ces séquences a suggéré que ces transporteurs neuronaux constituent une nouvelle famille de protéines. Ces progrès rapides laissent présager un développement comparable à celui des récepteurs et des canaux ioniques, ouvrant de nouvelles voies de

recherches fondamentales on appliquées : analyse des mécanismes de transport et de leur régulation, mise au point de drogues, étude du mécanisme de dégénérescences nerveuses.

### **Polarité et cycle cellulaires**

Toute cellule, que ce soit un neurone, un macrophage, une cellule rénale ou thyroïdienne, possède une polarité structurale et fonctionnelle, essentielle à son activité. L'établissement et le maintien de cette polarité demandent à être élucidés, dans tous leurs aspects : l'asymétrie de distribution des organites comme le centrosome ou l'appareil de Golgi, l'asymétrie d'activité de la membrane plasmique, l'orientation du trafic de macromolécules, ainsi que la locomotion cellulaire dont l'efficacité implique la mobilité de la cellule et son adhésion à l'environnement.

Le cycle de division cellulaire est une propriété essentielle de la cellule vivante. Les mécanismes de son contrôle temporel, véritable horloge biochimique, semblent universels, de la levure à l'homme. Comment sont-ils réciproquement asservis à la duplication et à la distribution des organites entre les deux cellules-filles ? De même, comment se maintient la polarité durant la croissance et la division ? On sait déjà que la genèse de la polarité des cellules-filles passe par l'établissement d'une organisation bipolaire transitoire, lors de la mitose, préparée par un long processus de duplication des déterminants cytoplasmiques de la polarité cellulaire, au cours de l'interphase. L'enjeu scientifique de ces questions et leur potentiel d'applications sont considérables.

## **Bioénergétique cellulaire**

### **Le fonctionnement mitochondrial**

Le mécanisme de l'oxydation phosphorylante mitochondriale, qui chez la plupart des espèces animales produit au moins 90 % de l'*ATP* utilisé par les cellules, est maintenant largement élucidé, confirmant la théorie chimiosmotique de Mitchell : l'éner-



gie d'oxydo-réduction des nutriments est transformée par la chaîne respiratoire en un gradient de potentiel des ions  $H^+$  (force protonmotrice), dont la dissipation au niveau de l'ATP-synthétase fournit l'énergie nécessaire à la synthèse de l'ATP

Cependant, le problème du couplage au niveau de l'ATP-synthétase n'est toujours pas résolu, malgré les efforts accomplis en biologie moléculaire et structurale. Par ailleurs, l'étude du complexe I de la chaîne respiratoire a révélé une complexité insoupçonnée : il comporte près de 30 sous-unités dont plusieurs sont des peptides à fonction redox. Une fraction des sous-unités des complexes respiratoires est codée par le génome mitochondrial, dont les mutations peuvent aboutir à des déficits fonctionnels, caractérisant une pathologie nouvelle, les myopathies mitochondriales.

Le fonctionnement mitochondrial fait aussi intervenir des transporteurs membranaires et des canaux ioniques. Par leur structure primaire, la plupart des transporteurs mitochondriaux d'anions métaboliques appartiennent à une même famille. Ainsi, la protéine découplante du tissu adipeux brun des Mammifères dérive vraisemblablement du transporteur des adénine-nucléotides. La méthode du "*patch clamp*" a permis de détecter la présence de canaux anioniques et cationiques dans les membranes mitochondriales externe et interne.

### **Consommation d'oxygène extramitochondriale**

Des progrès importants ont concerné les systèmes mis en cause : le cytochrome P450, dont on a mis en évidence de nombreuses isoformes avec des fonctions spécifiques, les oxydases mixtes, et les systèmes producteurs d'ions superoxyde  $O_2^-$ , dont un type est particulièrement développé dans les cellules phagocytaires. La pathologie humaine a également suscité un regain d'intérêt pour les peroxysomes, organites dont une des fonctions est la dégradation des acides gras à longue chaîne.

### **Activation de la production d'ATP**

La production d'ATP doit être ajustée en fonction des besoins de la cellule. La théorie classique du contrôle par le produit de dégradation (ADP) a vu son champ de validité fortement réduit. Le travail du cœur peut en effet augmenter de 2 ou 3 fois, *in vivo* (étude par RMN) ou *in vitro*, sans augmentation du rapport ADP/ATP. Un mécanisme remarquable a été identifié : l'augmentation du calcium intracellulaire, en même temps qu'elle assure la transduction du signal activateur extracellulaire, active la chaîne respiratoire mitochondriale, anticipant sur les besoins d'ATP. Cet aspect pourtant essentiel du fonctionnement cellulaire est peu étudié en France.

### **Mécanismes de la photosynthèse**

C'est un domaine où les chercheurs français jouent un rôle particulièrement actif. La quasi-totalité des complexes membranaires photosynthétiques ont été isolés. La connaissance de leur structure progresse rapidement grâce à la cristallisation à deux ou trois dimensions ainsi qu'à la modélisation. Les centres réactionnels constituent un modèle de choix pour l'étude des relations structure-fonction, qui combine les approches structurales, la spectroscopie d'éclair et la mutagenèse dirigée éventuellement suivie de réimplantation dans des membranes natives. On étudie activement le mécanisme de décomposition de l'eau ainsi que le fonctionnement des cytochromes *b/f* et *b/c*. Une ligne de recherche nouvelle porte sur l'organisation supramoléculaire des complexes, qui joue vraisemblablement un rôle important dans la régulation de la photosynthèse. Enfin, on cherche à replacer l'appareil photosynthétique dans son environnement cellulaire : biosynthèse des constituants, interactions entre chloroplastes et autres compartiments cellulaires.

### **Biologie cellulaire des processus infectieux**

Issue d'études sur les virus, une nouvelle discipline, la biologie cellulaire des processus infec-

tieux qui étudie l'interaction des microorganismes pathogènes avec les cellules, est en train de s'étendre rapidement aux domaines de la bactériologie, de la mycologie et de la parasitologie. Elle bénéficie notamment des systèmes de culture cellulaire sur filtre, permettant par exemple l'obtention de monocouches épithéliales différenciées et polarisées reproduisant autant que possible l'épithélium réel; elle fait largement appel aux méthodes de la biologie cellulaire (microscopie électronique, a balayage, confocale, microcinématographie, etc.). Les progrès les plus marquants ont concerné les points suivants :

### **les processus d'adhésion et d'entrée des pathogènes dans les cellules**

Il est maintenant probable que l'adhésion du pathogène se fait par la liaison des lectines de sa surface sur des parties glycosylées de lipides ou de protéines de la surface de la cellule eucaryote, tandis que l'entrée dans la cellule met en jeu des interactions protéine-protéine entre des molécules de la surface du pathogène et des molécules d'adhésion de la cellule eucaryote (intégrines, ICAM, voir ci-dessous). On commence tout juste à évaluer le jeu subtil par lequel les pathogènes trompent leurs cellules-cibles, en exprimant des protéines d'adhésion ou des récepteurs ressemblant à ceux des eucaryotes. Ainsi, grâce à la synthèse d'un analogue d'un récepteur à tyrosine phosphatase, *Yersinia* est capable d'inhiber les processus phagocytaires. Enfin, on a réussi à exprimer le récepteur humain du virus de la poliomyélite chez des souris transgéniques, les rendant capables de développer une poliomyélite typique.

### **Mécanismes de survie et de croissance des pathogènes dans les cellules**

La génétique moléculaire permet d'obtenir des mutants de bactéries pathogènes incapables de se développer au sein des compartiments subcellulaires cibles, et donc de déterminer les substances nécessaires à la survie et à la multiplication, notamment dans les cellules phagocytaires : résistance aux protéines lysosomales, aux mécanismes de

dégradation ou de présentation des antigènes du pathogène. Ces Travaux ouvrent d'immenses perspectives en vaccinologie.

### **Circulation des pathogènes dans les cellules infectées**

C'est un domaine encore mal connu. On vient de montrer que des bactéries libres dans le cytoplasme (*Sbigella*, *Listeria*) avaient la capacité d'organiser l'actine cellulaire de façon à se propulser au sein des cellules et d'une cellule à l'autre. Ces mécanismes locomoteurs paraissent essentiels pour la colonisation des tissus et font depuis un an l'objet de nombreux travaux.

### **Mécanismes de destruction des cellules eucaryotes par les pathogènes**

Un certain nombre de toxines cytotoxiques ont été décrites, mais dans bien des cas la cinétique de mort des cellules est incompatible avec les fonctions connues de ces toxines. On sait depuis peu que *Sbigella* tue les macrophages par un processus de mort cellulaire programmée (apoptose, voir ci-dessous). Ceci ouvre la voie à de nouveaux types de cytotoxicité.

## **2 - DE LA CELLULE AUX ENSEMBLES ORGANISÉS**

### **Contacts entre cellules et migration cellulaire**

formation de structures pluricellulaires organisées dépend de phénomènes de reconnaissance ou d'adhésion entre les cellules. La caractérisation des protéines d'adhésion cellulaire constituera encore un enjeu fondamental de la prochaine décennie. La découverte de ces molécules permet d'appréhender de nombreux phénomènes restés jusque là sans rapport apparent : d'une part des phénomènes de développement, organisation de

structures pluricellulaires en feuillets, morphogénèse et établissement de connexions nerveuses, et d'autre part des réponses biologiques adaptatives telles que réparation tissulaire, hémostasie, réponses immunes et inflammatoires.

Les cellules disposent de deux modes d'interaction avec leur environnement : les molécules d'adhésion cellulaire ou *CAM* sont en principe impliquées directement dans les mécanismes d'adhésion intercellulaire, alors que les *SAM* assurent les interactions entre la surface des cellules et la matrice protéique ou glycoprotéique extracellulaire. A l'heure actuelle, plusieurs familles distinctes de glycoprotéines ou de protéoglycanes adhésives ont été décrites : les Ig-CAM, les cadhérines (régulées par le calcium), les sélectines, les protéoglycanes, et enfin les intégrines, qui se lient principalement aux SAM. Les SAM sont elles aussi très diversifiées (collagènes, laminines, fibronectines, etc.).

On verra ci-après le rôle joué par ces différentes protéines dans les phénomènes immunitaires et du développement. Pour la migration cellulaire, les cellules de Langerhans (cellules immunocompétentes des épithéliums) offrent un bon exemple ; la présence d'intégrines à leur surface assure vraisemblablement leur migration de la moelle osseuse vers l'épiderme, puis vers les ganglions lymphatiques afin de présenter aux lymphocytes T les antigènes captés dans l'épiderme.

## Le système immunitaire

Le système immunitaire constitue l'un des grands systèmes physiologiques des Mammifères. Nombre de ses fonctions utilisent les voies classiques de la physiologie cellulaire; il possède cependant sa propre personnalité, caractérisée par un équipement génétique considérable qui lui permet de faire la différence entre le soi et le non-soi. Cette propriété est assurée par les lymphocytes B et les lymphocytes T, qui utilisent des formes différentes des récepteurs spécifiques de l'antigène.

Les lymphocytes B synthétisent les anticorps, qui reconnaissent directement un fragment de l'antigène, tandis que les lymphocytes T reconnaissent l'antigène par l'intermédiaire des récepteurs T ou TcR (*cf. ci-dessous*). Anticorps et TcR sont des immunoglobulines. Bien que de nature différente, ils sont confrontés à la même difficulté : comment réaliser un nombre considérable de structures différentes, capables de reconnaître spécifiquement des millions d'antigènes distincts, avec un nombre limité de gènes. Chaque anticorps ou TcR résulte d'une combinatoire permettant l'association au hasard d'un nombre relativement restreint de segments géniques différents codant pour des chaînes distinctes; celles-ci s'associent également au hasard pour former une molécule complète et fonctionnelle. La diversité résultant de cette combinatoire est encore largement amplifiée par des mécanismes somatiques. Des progrès très rapides sont en cours dans les domaines suivants :

### **La présentation de l'antigène aux lymphocytes T**

La reconnaissance de protéines antigéniques par les lymphocytes T nécessite leur dégradation en peptides, par l'intermédiaire d'une cellule présentatrice de l'antigène, et l'association de ces peptides avec des molécules de classe I ou de classe II du complexe majeur d'histocompatibilité (CMH, ou chez l'homme système HLA). La reconnaissance des complexes peptides-molécules du CMH par le TcR de lymphocytes T spécifiques conduit à leur activation. La réponse immunologique T diffère selon la classe de la molécule du CMH engagée dans la formation du complexe. Les complexes peptide-molécule de classe II sont reconnus par les lymphocytes T de type CD4<sup>+</sup>, qui ont, pour la plupart, une fonction d'aide à la réponse immunitaire. Les molécules du CMH de classe I interagissent avec les lymphocytes T de type CD8<sup>+</sup>, généralement, cytotoxiques.

Les molécules de classe I sont spécialisées dans la présentation de protéines endogènes et lient les peptides dans le réticulum endoplasmique, en association avec la  $\beta_2$ -microglobuline. Les molécules de classe II, exprimées seulement sur certaines cellules (ex. cellules B, macrophages), sont



spécialisées dans la présentation de protéines internalisées par endocytose. La liaison entre la molécule et un peptide exogène se fait au niveau d'endosomes tardifs ou de pré-lysosomes. Dans tous les cas, le complexe ainsi formé est exprimé à la surface cellulaire de manière stable et est reconnu par les lymphocytes T correspondants.

La présentation de l'antigène constitue une étape décisive dans le déclenchement de la réponse immunitaire, nécessitant des phénomènes de coopération entre cellules, et, au sein des lymphocytes effecteurs, une cascade d'interactions moléculaires qui conditionnent leur différenciation. Ces phénomènes font intervenir des molécules de surface qui induisent l'activation de messagers intracellulaires. L'un des signaux est fourni par les cytokines (ex. interleukine).

### **tes molécules d'adhésion**

Plusieurs familles de molécules responsables de l'adhésion intercellulaire participent à ces événements : cadhérines, intégrines, sélectines et des molécules apparentées aux immunoglobulines. Parmi ces dernières, il faut signaler la protéine N-CAM ("*neural cell adhesion molecule*") dont l'expression, sous forme de produits divers d'épissage différentiel du gène, est relativement ubiquiste. Son rôle dans le guidage des axones et l'établissement de réseaux neuronaux a été reconnu, et il est remarquable que, dans cette lignée moléculaire, la fonction d'adhésion ait précédé dans la phylogénèse l'émergence des molécules de reconnaissance du système immunitaire. Des molécules de cette même famille, d'apparition plus récente, sont impliquées dans l'adhésion des lymphocytes T.

## **Différenciation, vie et mort des cellules**

### **Mécanismes de la régulation de l'expression génétique**

L'étude des mécanismes fondamentaux de la régulation de l'expression génétique connaît elle

aussi une expansion rapide. Un enjeu thérapeutique majeur est sa modulation artificielle, qui représenterait une révolution en pharmacologie. Nous avons cité l'utilisation d'oligonucléotides antisens chez des patients leucémiques. Un procédé analogue pourrait déboucher sur l'inhibition de l'expression de facteurs de croissance tumorale, ou de celle d'oncogènes mutés (ex. *ras*), permettant la réversion d'un phénotype malin vers un phénotype normal.

### **Mécanismes de l'entrée des cellules dans un cycle de mort programmée**

On distingue depuis peu deux types de mort cellulaire, la *nécrose*, qui fait suite à un traumatisme aigu, et la mort cellulaire programmée ou *apoptose*, qui est un phénomène essentiel du développement de l'organisme, car elle intervient dans de nombreux processus de morphogénèse et de différenciation (et dans la régression tumorale). Sur le plan morphologique, la nécrose se traduit par un gonflement cellulaire suivi de rupture membranaire; l'apoptose, par des phénomènes de condensation et fragmentation au niveau du cytoplasme et de la chromatine. Du point de vue moléculaire, la nécrose est un phénomène passif, tandis que l'apoptose pourrait résulter de l'activation d'un programme génétique spécifique conduisant à la synthèse de protéines létales, comme l'indique le blocage de l'apoptose par des inhibiteurs de la synthèse de TARN ou des protéines.

Quelques gènes susceptibles d'intervenir dans la mort programmée ont été identifiés. Trois d'entre eux, intervenant dans le développement d'un ver nématode, ont été clonés. Chez les Mammifères, l'effet tumorigène de l'oncogène *bcl 2* résulte du blocage de l'apoptose des lymphocytes B, et non d'une stimulation proliférative ; à l'inverse, le gène *myc* peut induire l'apoptose dans les fibroblastes. Sur le plan thérapeutique, il va être possible de déterminer si l'activation de gènes de l'apoptose intervient dans les maladies dégénératives. De plus, des ligands capables d'activer ces gènes pourraient constituer des agents antitumoraux.

## Mécanismes de la dégénérescence cellulaire

Les phénomènes de dégénérescence cellulaire concernent en particulier deux types de maladies, les maladies auto-immunes (ex, diabète de type 1, encéphalo-myélite allergique), dont les mécanismes moléculaires sont encore mal connus, et le vieillissement cellulaire (ex, maladies d'Alzheimer et de Parkinson). Le développement et la survie des cellules sont influencés par de nombreux facteurs de croissance (ex. NGF, FGF). Au niveau du système nerveux central, ils agissent sur la survie des neurones, stimulent la synthèse de neurotransmetteurs, et protègent certains neurones contre des intoxications chimiques. Leur rôle éventuel dans l'inhibition de la dégénérescence est un domaine en pleine expansion.

## Biologie du développement et de la reproduction

### la *biologie du développement*

L'essor de la biologie du développement depuis une décennie a concerné principalement la génétique. La découverte de la très grande conservation à travers les règnes animal et végétal de séquences importantes pour la régulation de l'expression génique a permis de concentrer sur un nombre réduit d'espèces la recherche des gènes homologues. Les travaux sur la plante *Arabidopsis*, le ver Nématode *Caenorhabditis*, la drosophile, la souris et l'homme ont fourni les bases de la compréhension des mécanismes du développement. Le succès de la convergence des efforts sur quelques espèces-modèles doit amener à poursuivre dans cette voie.

L'approche des phénomènes de base du développement, comme la prolifération cellulaire, la migration, l'adhésion ou la mort programmée, s'est transformée. On est passé d'une phase purement descriptive à une dissection génétique et expérimentale qui est en train de modifier radicalement la compréhension des phénomènes. On a ainsi abouti à l'identification de séquences régulatrices de la

transcription et à une meilleure compréhension de la régulation temporelle et spatiale de l'activité génique. Les études de morphogénèse se sont elles aussi, modernisées au contact de l'ingénierie génétique.

Les approches génétiques elles-mêmes évoluent. Il ne suffit plus de cloner un gène sans se préoccuper de son rôle dans le développement. On cherche maintenant à disséquer génétiquement, un processus d'ensemble, comme la communication cellulaire ou la segmentation. Au niveau de la régulation de l'expression génique, l'intérêt est passé du contrôle "arrêt-marche" d'un gène à un moment donné vers le maintien de cet état de détermination. Différentes combinaisons de molécules reconnaissent et maintiennent les gènes de différenciation à l'état actif ou inactif à travers les divisions cellulaires successives. Les homologues de ces gènes régulateurs avec des oncogènes, et l'intégration des gènes homéotiques dans ce contexte suscitent un intérêt croissant.

Dans beaucoup d'organismes, des états néoplasiques ou cancéreux sont associés à l'altération de gènes essentiels au développement normal. Cette découverte a entraîné une collaboration féconde entre les spécialistes du cancer et ceux de la biologie du développement.

Signalons enfin deux, apports très importants :

- le réemploi dans le développement tardif de mécanismes génétiques intervenant à un stade précoce : ainsi chez l'insecte, la formation du système nerveux central de l'embryon et celle des organes sensoriels de l'adulte mettent en jeu les mêmes gènes, qui contrôlent en fait la communication cellulaire;

- l'homologie remarquable, dans tous les organismes, des mécanismes de base régissant la formation des axes antéro-postérieurs et dorso-ventraux, celle des métamères et la croissance des extrémités.

La dissection génétique de processus comme l'information positionnelle, la régulation du cycle

cellulaire, la segmentation, l'induction, les mouvements morphogénétiques, la gamétogénèse et la fécondation sont des thèmes d'avenir que la recherche française ne doit pas manquer.

Soulignons toutefois que le dynamisme des approches génétiques du développement a entraîné une désaffection pour l'étude de ses conditions énergétiques et nutritionnelles. A l'heure où la malnutrition frappe tant de jeunes êtres humains, est-il bien sage de se limiter aux aspects informationnels ?

### ***Reproduction et développement***

Le développement d'un organisme ne peut pas se faire sans le préalable de la formation des gamètes, qui s'inscrit dans la biologie et la physiologie de la reproduction. Ces dernières, en particulier dans leurs aspects finalisés (ex. homme, mammifères domestiques, poissons, insectes), nécessitent d'aborder les problèmes au niveau de l'organisme entier, et de prendre en compte les différences entre espèces. On Ta vu ci-dessus avec les spécificités des ovins.

Les thèmes scientifiques prioritaires dans ce domaine concernent les mécanismes neuroendocriniens de contrôle de l'axe hypothalamo-hypophysaire, et les mécanismes endocriniens et paracrines du contrôle des gamétogénèses mâle et femelle.

L'étude des mécanismes neuroendocriniens du contrôle de la fonction de reproduction doit prendre en compte l'influence des facteurs externes d'environnement physique (lumière, température) et social (présence de partenaires sexuels, de nouveaux-nés et de jeunes ou de congénères). La réussite d'une telle approche nécessite une collaboration étroite entre neurobiologistes, endocrinologues, éthologues et chirurgiens. Les gamétogénèses mâle et femelle sont dépendantes d'interactions cellulaires étroites entre la lignée germinale et différents types cellulaires somatiques gonadiques. L'étude de ces interactions en termes moléculaires ainsi que celle des conséquences induites sur le métabolisme, le cytosquelette,

l'expression génomique et la structure nucléaire des cellules germinales est un enjeu difficile mais indispensable pour aborder dans de bonnes conditions l'étude du développement du zygote. Ces connaissances sont également un préalable à la réussite des techniques de transgénèse et de clonage chez les animaux domestiques. Dans tous les cas, des efforts particuliers doivent porter sur la chimie des composants membranaires et cellulaires (protéines, glycoprotéines, glycolipides, phospholipides) ainsi que sur les approches de physiologie cellulaire et de biologie moléculaire.

En particulier, il faudra considérer de manière globale les interactions du génome avec les protéines régulatrices (facteurs de transcription, récepteurs divers,,,) et avec celles de la matrice nucléaire. Les interactions nucléo-cytoplasmiques apparaissent également d'une importance primordiale dans la gamétogénèse,

### **Problèmes spécifiques aux végétaux**

Des progrès importants ont concerné les interactions de la plante avec son environnement, biotique et abiotique, et le contrôle des processus de développement (floraison, maturation de fruits). Ils ont été obtenus grâce à la mise en œuvre d'approches pluridisciplinaires allant de la biochimie de base à la construction de plantes transgéniques. Cependant, une telle intégration n'est pas encore suffisamment généralisée en raison des difficultés techniques et humaines liées à la mise en place d'équipes à compétences multiples. Dans les cas cités ci-après, la communauté française a apporté une contribution éminente et a fait souvent figure de précurseur.

### ***Métabolisme et régulation***

Des avancées significatives ont été effectuées quant à la régulation de la photosynthèse, les relations carbone/azote, la nutrition minérale et le métabolisme des lipides. On peut citer la régulation du fonctionnement de la phosphoenolpyruvate car-



boxylase et l'intervention de la lumière dans la néosynthèse de la protéine kinase spécifique de l'enzyme cible. La photodépendance du système permet un contrôle très fin du flux de carbone chez les plantes dites de type C4. Par ailleurs, il est maintenant établi que la prise en charge du fer est assurée par la ferritine aussi chez les plantes, où la synthèse de cette protéine est régulée par une substance de croissance.

On sait depuis peu que la protéine de transfert des phospholipides intervient également dans l'embryogenèse somatique. Les communications entre organes passent aussi par les échanges d'éléments nutritifs. Le saccharose est véhiculé par la sève grâce à des transporteurs membranaires qui viennent d'être identifiés. En plus de leur rôle trophique, il apparaît de plus en plus clairement que les glucides ont un rôle morphogène, en contrôlant le niveau d'expression de nombreux gènes aussi bien dans les organes exportateurs qu'importateurs. Ce concept renouvelle complètement rapproche des régulateurs de croissance chez les végétaux.

L'analyse en spectrométrie de masse et la RMN des isotopes naturels (non invasive) ont ouvert des voies nouvelles d'intégration des mécanismes moléculaires dans le fonctionnement de la plante entière. La RMN a ainsi permis de démontrer que l'homéostasie du pH cytoplasmique repose sur une action complémentaire des pompes à protons des membranes plasmique et vacuolaire. Les progrès récents de l'imagerie et de la spectroscopie localisée par RMN devraient permettre d'obtenir des informations spatio-temporelles sur le métabolisme *in situ*.

### **cellulaire : perception et transduction de signaux**

Dépourvus de systèmes nerveux et immunitaire, les végétaux possèdent néanmoins des moyens efficaces pour percevoir l'environnement, s'y adapter et pour échanger des informations entre organes. La connaissance de la perception et de la transduction des signaux, de l'expression spatiale et temporelle de gènes régulateurs a progressé grâce

à l'association d'équipes aux compétences complémentaires.

Ainsi, dans le cas de la fixation symbiotique de l'azote, la mise en œuvre concertée de méthodes de biochimie structurale et de biologie cellulaire et moléculaire a permis d'identifier les composés de la famille *NOD*. Ces glycoconjugués complexes, dont la production par les bactéries symbiotiques est induite par des polyphénols de la plante, provoquent l'apparition de nodules sur les racines. La structure de l'inducteur et son efficacité sont étroitement corrélées avec sa spécificité d'hôtes.

La connaissance des mécanismes de contrôle du développement ou de la résistance aux phytotoxines a considérablement progressé. Des protéines réceptrices (canaux) pour des substances de croissance ou des toxines ont été isolées et incorporées dans des liposomes avec restauration de leurs activités de transport ionique. Les premiers gènes de canaux à potassium ont pu être isolés et exprimés par complémentation génétique. Les rôles du proton ou du calcium dans le couplage stimulus-réponse ont été largement démontrés, notamment par construction de plantes transgéniques exprimant l'aequorine (photoprotéine affine pour le calcium). L'acide salicylique et le glutathion interviennent également.

Les progrès enregistrés quant aux modes d'action des substances de croissance débouchent maintenant sur la maîtrise de la maturation des fruits.

### **Connaissance et expression des génomes nucléaires et cytoplasmiques**

Les gènes régulateurs jouent un rôle très important dans le développement de l'organisme. La Crucifère *Arabidopsis Thaliana*, avec un génome relativement simple, un temps de génération très court et une fécondité élevée se prête bien à l'étude de la différenciation d'organes et de la formation de fleurs. Cependant, une méthode génétique nouvelle dite QTL ("*quantitative trait loci*"), basée sur l'étude chez des plantes cultivées (maïs, tomate, riz) de

lignées isogéniques issues de deux parents éloignés, paraît également très prometteuse. Elle permet d'associer à des marqueurs génétiques des caractères quantitatifs quelconques, tels que taille d'organes ou activités enzymatiques. La puissance de la méthode résulte du fait que l'on peut décomposer un caractère complexe en une série de caractères génériques simples, et repérer les éléments communs, qui ont de fortes chances d'être des gènes régulateurs.

Un vaste programme visant à construire des banques ordonnées d'ADNc d'*Arabidopsis* exprimées dans des situations physiologiques définies (maturation de graine, induction par des substances de croissance...) suivies d'un séquençage systématique devrait permettre des percées décisives dans le domaine du fonctionnement des plantes.

### 3 - L'INTÉGRATION PAR LES SYSTÈMES DE COMMUNICATION

Le gouvernement des Etats-Unis a décidé que la décennie des années 1990 serait celle du cerveau. Ceci répond à des besoins de santé publique, liés à l'allongement de la durée de vie, mais aussi à la constatation que les neurosciences constituent un domaine en plein essor. La rapidité des progrès est due pour une part à des développements technologiques, comme en témoigne l'attribution du prix Nobel de physiologie 1991 aux inventeurs du "*patch clamp*", mais aussi aux efforts convergents de disciplines très diverses, biologie moléculaire et cellulaire, immunologie, neurochimie et neurophysiologie.

#### La transduction des messages

Les messages chimiques reçus par les neurones (neuromédiateurs, hormones, cytokines) activent des récepteurs. La caractérisation pharmacologique de ces protéines membranaires est en voie d'être complétée et affinée grâce à leur purification et à leur séquençage. Des concepts nouveaux se dégagent :

- il existe des familles de récepteurs à structure voisine, probablement dérivés des mêmes gènes;

- un même médiateur peut activer plusieurs types de récepteurs, de structures et de fonctions différentes;

- contrairement à une théorie classique, plusieurs médiateurs peuvent être colocalisés dans un même neurone, en interaction réciproque. Enfin, l'expression ou non d'un récepteur existant fait elle-même l'objet d'une régulation. La multiplicité des sous-types de récepteurs et leur variabilité interspécifique entraînent la nécessité d'études plus approfondies avant le passage aux applications pharmacologiques.

Suivant les types de récepteurs, les modalités de la transduction du signal apparaissent de plus en plus variées : couplage avec une protéine G et production d'un second messenger intracellulaire, ouverture d'un canal ionique lié au récepteur, modulation d'un canal dépendant du voltage. Les récepteurs sensoriels, en raison de la diversité de leurs stimuli, ont apporté des informations très intéressantes : mécanisme de la phototransduction, organisation de la réception auditive, codage de l'information chimique, olfactive ou gustative.

La connaissance du fonctionnement des canaux a elle-même beaucoup progressé, grâce à la méthode du "*patch clamp*" qui permet d'appréhender directement les cycles ouverture-fermeture des canaux, et à la biologie moléculaire : séquençage, transfection d'ovocytes de batraciens suivie d'étude au moyen du "*patch clamp*" des canaux - normaux ou modifiés - exprimés dans ces cellules qui en sont habituellement dépourvues.

#### Niveaux élémentaires d'organisation

Les systèmes nerveux d'Invertébrés, où des réseaux complets de neurones individuellement identifiés peuvent être étudiés *in vitro*, ont continué à ouvrir la voie, montrant l'existence de phéno-

mènes de plasticité beaucoup plus étendus qu'on ne le supposait. En interaction avec les neurones, les cellules gliales se voient attribuer des rôles de plus en plus variés (métabolisme, développement). Les cultures cellulaires permettent également d'aborder les problèmes de développement du système nerveux : différenciation, polarité, guidage axonal.

Parallèlement à ces travaux, on a déterminé la pression partielle d'oxygène existant *in vivo* dans les tissus des Crustacés : celle-ci ne dépasse pas normalement le dixième de la pression partielle de l'air. Cette stricte économie du vivant contraste avec les conditions pléthoriques le plus souvent utilisées dans les études *in vitro*.

Une discipline nouvelle est apparue, la neuro-immunologie, qui étudie les interactions entre les systèmes nerveux et immunitaire. Les récepteurs cérébraux des cytokines (sécrétées par les macrophages ou par des cellules microgliales) sont en voie d'identification, ainsi que leurs mécanismes d'action sur les axes neuroendocriniens. Leur intervention dans le fonctionnement normal du cerveau et les phénomènes de dégénérescence est de plus en plus probable.

## Systèmes intégrés

L'analyse du fonctionnement des grands systèmes fonctionnels (ex, informations sensorielles, motricité, sommeil, apprentissage, mémoire) est activement approfondie. Les techniques d'approche *in vivo* se multiplient, avec notamment la microdialyse, qui permet de doser les neuromédiateurs libérés dans un territoire donné. De nombreux progrès sont dus au développement de la neuro-anatomie, grâce aux méthodes neurochimiques et immunohistochimiques (marquage de neurones renfermant des médiateurs ou enzymes) et depuis peu à l'hybridation *in situ*. Cette dernière a permis la mise en évidence de l'activation précoce de proto-oncogènes, codant pour des facteurs de transactivation d'autres gènes, au cours de phénomènes tels que les crises convulsives ou des stimulations senso-

rielles. Elle s'annonce comme une des méthodes majeures dans les années à venir.

## Neurosciences cognitives

Le développement des neurosciences cognitives (traitées principalement au chapitre 21) s'appuie largement sur celui des neurosciences en général, notamment la neurophysiologie, la neuroanatomie, l'utilisation d'animaux transgéniques. Ce domaine a connu récemment un renouveau conceptuel avec la notion que le cerveau possède une plasticité, qui s'exprime à tous les niveaux : développement, apprentissage, mémorisation ou restauration fonctionnelle après traumatisme. Les voies les plus prometteuses concernent la plasticité synaptique (potentialisation ou dépression à court ou à long terme, néosynaptogenèse) et les facteurs trophiques, tropiques ou tactiques intervenant dans la construction ou la restauration du système nerveux. Un secteur très important est celui des transplantations cérébrales, tant par les fenêtres qu'elles ouvrent sur des mécanismes fondamentaux que par les perspectives d'applications cliniques. Ces dernières - faut-il le rappeler - reposent sur le préalable d'expérimentations animales bien conduites.

On place également beaucoup d'espoirs dans les progrès de la neurogénétique, de la neuropsychologie et de l'imagerie médicale.

L'étude des réseaux neuronaux du cerveau ouvre sur les aspects élémentaires du fonctionnement cognitif. Elle débouche sur les réseaux neuronaux et l'intelligence artificielle, avec une fécondation réciproque et de nombreuses applications potentielles (robotique, communication homme-machine). Toutefois, une fonction cérébrale n'est pas réductible au fonctionnement d'une sous-structure ; la mémoire met en jeu le cerveau dans sa totalité.

Enfin, les neurosciences illustrent, particulièrement bien un problème commun à tous les domaines des sciences de la vie, celui de la coordination à établir entre les informations recueillies à des niveaux d'intégration très variés (préparation



subcellulaire, cellule isolée, tranche, animal) et avec des méthodes ou des conditions de milieu inévitablement différentes

## **4 - L'ORGANISME ET SON ENVIRONNEMENT**

### **Les transformations méthodologiques et conceptuelles**

Classiquement, la physiologie environnementale se limitait aux contraintes exercées par le milieu sur les organismes et aux réponses qu'elles suscitent, instantanées (régulations) ou à plus long terme (adaptations). L'apparition de nouvelles méthodes d'étude *in vivo*, en laboratoire et même sur l'animal en liberté, a renouvelé ce domaine, tout en permettant d'établir des liaisons avec les approches cellulaires et moléculaires.

La conception "contrainte-réponse" se révèle maintenant trop étroite. Comme le milieu constitue soit l'origine, soit la destination finale des flux de matière et d'énergie de l'organisme, la physiologie environnementale en vient à considérer ces derniers dans leur ensemble, jusqu'aux niveaux cellulaire et subcellulaire.

L'acquisition de nourriture et la réponse aux contraintes environnementales (migrations) sont responsables de la majorité des déplacements des espèces animales. Ceux-ci à leur tour constituent souvent une fraction importante du budget énergétique (près des 3/4 chez un oiseau qui élève ses petits). C'est à ce titre que nous incluons dans ce chapitre la physiologie de l'exercice musculaire.

### **L'adaptation et ses bases cellulaires et moléculaires**

En raison de la faible solubilité de l'oxygène dans l'eau, l'hypoxie, surtout lorsqu'elle se combine

avec un exercice musculaire, représente un risque majeur pour les animaux à respiration aquatique, et une cause de mortalité dans les élevages et les rivières où elle renforce les effets des pollutions. On sait depuis peu que chez les Poissons, les catécholamines libérées dans le sang en réponse à l'hypoxie ou à l'effort améliorent l'efficacité du transport de l'oxygène. Deux laboratoires français ont montré que cet effet met en jeu la liaison de l'hémoglobine à la membrane érythrocytaire, et l'activation de l'échangeur  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  par un mécanisme semblable à celui de la rhodopsine des cellules visuelles.

De son côté, le milieu aérien peut exposer les organismes à des variations thermiques importantes. De gros progrès ont été réalisés, grâce notamment à la biologie moléculaire, dans l'étude du fonctionnement et de la différenciation du tissu adipeux brun, source de thermogénèse de réchauffement chez les petits mammifères et le nouveau-né humain, ainsi que sur la thermogénèse sans frisson chez l'oiseau.

### **Echanges de matière et d'énergie**

Les ressources alimentaires du milieu sont souvent soumises à d'importantes fluctuations, D'où l'importance des mécanismes de mise en réserve d'énergie (réserves lipidiques). Des travaux récents mettent en évidence le caractère sélectif du stockage et du déstockage des différents acides gras. Les conséquences observées *in vivo* (ex. facilitation de la torpeur circadienne et de l'hibernation par les acides gras insaturés) reposent vraisemblablement sur les différences constatées au niveau moléculaire (interactions lipides-protéines, précurseurs de substances de communication),

Un autre domaine prometteur concerne les mécanismes de la dépression métabolique, permettant à l'animal de passer une phase critique (plongée sous-marine, hibernation, diapause). Les recherches portent sur les mécanismes biochimiques (réversion de mécanismes activateurs, ex. tissu adipeux brun en hibernation) comme sur leurs

voies de commande, et devraient déboucher à terme sur des applications cliniques.

Comme les précédents, ces résultats illustrent l'intérêt, pour le progrès des sciences de la vie, de bien utiliser la diversité des espèces et de leurs biotopes.

## Les rythmes biologiques

Les rythmes biologiques constituent des réponses adaptatives à la périodicité des facteurs environnementaux (paramètres météorologiques, présence des prédateurs ou des proies). Le site de l'horloge circadienne endogène a été localisé dans le noyau suprachiasmatique de l'hypothalamus, tandis que les voies et structures grâce auxquelles le cerveau reçoit et traite les signaux photopériodiques de synchronisation ont été largement élucidées (ex. glande pinéale). Les hormones et neuropeptides mis en jeu font également l'objet de travaux très actifs.

## Physiologie musculaire et sportive

La compréhension de l'énergétique musculaire, et de ses modifications sous l'effet de l'entraînement, a progressé grâce notamment à la RMN et aux biopsies, qui permettent un suivi des caractéristiques biochimiques. On a ainsi montré que l'entraînement de haut niveau à des sports d'endurance comme le cyclisme se traduit paradoxalement par une diminution de la proportion des protéines contractiles : la cellule musculaire accumule des lipides intracellulaires, qui seront utilisés à l'effort sans être soumis aux limitations du transport circulatoire.

Un domaine très actif concerne la régulation de l'angiogénèse et de l'expression des gènes codant la synthèse de protéines musculaires lors du développement musculaire (entraînement, restauration fonctionnelle) ou au contraire de l'atrophie (hypokinésie, microgravité lors des vols spatiaux). Un cas particulier très intéressant concerne

les enzymes telles que la cytochrome oxydase, dont certaines sous-unités sont codées par les gènes du noyau et les autres par ceux de la mitochondrie.

## Etudes physiologiques sur les organismes dans leur milieu naturel

La physiologie de la plongée sous-marine des Mammifères et Oiseaux connaît un renouveau complet grâce aux systèmes d'acquisition de données portés par l'animal et lus à son retour. Contrairement aux données classiques de laboratoire, l'animal fait rarement appel au métabolisme anaérobie, mais utilise quasi exclusivement ses réserves d'oxygène, dont la gestion est améliorée par le stockage/déstockage de globules rouges et probablement par la dépression du métabolisme.

## L'insuffisance des recherches face aux besoins cliniques

Les mécanismes biochimiques et cellulaires des lésions post-ischémiques apparaissant à la reperfusion dans le cœur ou le cerveau (infarctus, thrombose) font l'objet de nombreux travaux, qui ont mis en évidence des interactions complexes entre les cellules sanguines, la paroi vasculaire et les tissus (facteurs chimiotactiques et de coagulation, monoxyde d'azote, radicaux libres).

Il est cependant un domaine voisin qui, sans doute pour des raisons de mode, est presque complètement déserté par les expérimentateurs : celui de la circulation extra-corporelle et surtout de l'hypothermie artificielle qui lui est généralement associée. Chaque année en France, des milliers de transplantations et d'opérations de chirurgie cardiovasculaire font appel à cette méthode. Cependant les données de l'expérimentation animale sont très claires, laissant les équipes chirurgicales faire une large part à l'empirisme. Il y a là une insuffisance criante.

# ENVIRONNEMENT ET MOYENS DE LA RECHERCHE

## 1 - INVENTAIRE ET IDENTIFICATION DES ESPECES

Le nombre des espèces actuellement décrites ne représente probablement qu'une petite fraction des espèces existantes, dès que Ton quitte les écosystèmes ou les groupes zoologiques ou botaniques les plus explorés. Or, par exemple, au moment où les progrès de la biologie moléculaire nous font entrevoir la possibilité de créer de nouvelles symbioses entre bactéries et plantes cultivées, conférant à ces dernières la capacité de fixer l'azote de l'air, on évalue à 10 % seulement la fraction des bactéries du sol que l'on sait identifier

Le développement des sciences de la vie requiert par conséquent des spécialistes pour poursuivre l'inventaire des espèces, préserver les spécimens de référence et identifier les espèces à la demande. Or la systématique n'est plus considérée comme un domaine de recherche actif, en dehors de la systématique moléculaire qui ne prédispose plus les chercheurs à l'accomplissement de ces tâches de service. Elle est devenue une activité documentaire de très haut niveau.

Ne serait-il pas risqué, pour des organismes tels que le CNRS, de s'en remettre entièrement, pour une activité qui conditionne le succès de leurs programmes, à des organismes indépendants comme le Muséum, dont les choix pourraient éventuellement obéir à des critères fort différents ? Peut-être la solution résiderait-elle dans un partenariat qui codifierait les relations de réciprocité, et donnerait au CNRS les garanties nécessaires au déroulement de ses travaux ?

## 2 - L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE

L'expérimentation animale est essentielle au progrès de la biologie des organismes, et au développement d'applications indispensables sur le plan médical, agronomique ou pour la gestion de l'environnement. On a mentionné plus haut, la situation de certains domaines cliniques, où les patients sont exposés à des risques en raison de l'insuffisance des données expérimentales.

Vis-à-vis du public, il est très important que les organismes de recherche poursuivent avec détermination les efforts entrepris pour l'amélioration des animaleries, la formation du personnel et la mise en place de comités garantissant le respect des règles d'éthique. En contrepartie, l'Etat doit prendre avec vigueur la défense de ses chercheurs face aux accusations injustes et même aux actes de terrorisme auxquels ils sont exposés. Le public n'est-il pas susceptible de réagir positivement en faveur du soulagement des souffrances des malades - et du soutien à la recherche - lorsqu'on sait le lui demander ? L'exemple d'opérations comme le Téléthon devrait nous inciter à un certain optimisme.

## 3 - INSTRUMENTATION ET MÉTHODES

Enfin, comme celui des autres disciplines, le développement des sciences de la vie est conditionné par celui de la technologie instrumentale. En voici quelques exemples :

La microscopie confocale, couplée éventuellement avec les méthodes spectrofluorimétriques, devient la méthode de choix pour l'étude anatomophysiological des suspensions de cellules ou des tranches de tissus perfusées. La microscopie ionique analytique permet de déterminer les concentrations ioniques locales, avec une résolution atteignant 0.5  $\mu\text{m}$  et qui devrait être améliorée. Les lasers "picosecondes" permettent de disposer d'une résolution élevée sans accroître l'énergie moyenne à un niveau dangereux pour les cellules. Ils



devraient permettre des progrès substantiels dans l'étude des phénomènes photobiologiques transitoires et de l'activation de processus membranaires.

La résonance magnétique nucléaire devient une des méthodes de base d'étude des organismes *in vivo*. L'imagerie, jusqu'ici surtout statique, permet maintenant d'atteindre des variables physiologiques telles que le volume d'éjection systolique du cœur ou le débit sanguin des gros vaisseaux. La spectrométrie RMN localisée promet des progrès importants dans le suivi du métabolisme régional d'organes tels que le cerveau ou le foie. Les capteurs et systèmes d'acquisition de données por-

tables par le sujet permettent d'étudier l'animal en liberté dans son milieu naturel, ou le sujet humain dans ses activités quotidiennes.

En raison du coût de ces appareils et de la complexité de leur mise en œuvre, il faut impérativement leur affecter du personnel qualifié (ingénieurs ou techniciens) et optimiser leur utilisation, ce qui peut nécessiter la constitution de services communs.

**André Malan**  
*Président du groupe 18*

# 19

## SANTE ET THERAPEUTIQUE

### AVANT-PROPOS

La santé est une valeur individuelle et collective qui fait appel à des activités scientifiques extrêmement variées. Ce chapitre du rapport de conjoncture en témoigne. Les représentants de 24 sections du CNRS ont participé à sa rédaction. Cinq départements scientifiques du Comité national ont été mobilisés : physique nucléaire et corpusculaire, sciences pour l'ingénieur, sciences chimiques, sciences de la vie, sciences de l'homme et de la société. L'abord d'un champ aussi complexe nécessite un dialogue interdisciplinaire sous peine de se limiter à une juxtaposition des réflexions de spécialistes. Malgré les difficultés d'une telle démarche, ce rapport résulte de l'effort de réflexion transversale du groupe qui s'est réuni en alternance par grands domaines (physique, chimie et thérapeutique, biologie, sciences humaines et sociales), au niveau des représentants de ces grands domaines et dans sa totalité.

Il n'est cependant apparu ni réaliste, ni souhaitable, de regrouper toutes les disciplines concernées dans un moule unique. Le plan suivi est donc le suivant :

- *Le champ et ses enjeux* : enjeux, évolution et tendances, et situation des grands sous-ensembles individualisés au sein du groupe : 1) biologie et

médecine; 2) imagerie, rayonnement et biomécanique; 3) médicaments et nouvelles thérapeutiques; 4) sociétés et santé.

- *Quelques grands charniers* : analyse de quelques domaines où une réflexion multidisciplinaire a paru nécessaire.

- *Perspectives et recommandations* : l'émergence de recommandations voisines à partir des réflexions menées dans chacun des sous-groupes a permis de les rassembler en un chapitre commun.

### LE CHAMP ET SES ENJEUX

#### INTRODUCTION

##### L'essor et ses revers

La santé est un domaine scientifique où les progrès ont connu ces dernières années une accélération continue. L'expansion des techniques de biologie moléculaire est une des explications à ce phénomène. La conjonction de progrès dans les domaines de la biophysique et de l'informatique a

accéléral cette dynamique, L'intérêt des sociétés développées pour la santé et les investissements des pouvoirs publics et de l'industrie privée qui en découlent expliquent une sorte d'âge d'or des recherches en santé. Ces investissements paraissant d'autant plus justifiés qu'ils s'accompagnent de découvertes dont le nombre semble croître régulièrement et dont les conséquences sont souvent aisément perceptibles et largement médiatisées.

La situation est cependant loin d'être parfaitement satisfaisante : la disparité des retombées pratiques de cette activité scientifique entre le monde développé et le monde en voie de développement ne fait que s'accroître. Au sein même des pays développés persistent des inégalités d'espérance de vie difficilement acceptables. Ainsi, en France, douze années d'espérance de vie ont été gagnées depuis 1945, mais les inégalités entre les sexes et les catégories sociales se sont plutôt accentuées. L'épidémie de sida a fait prendre conscience qu'en biologie, rien n'est définitivement acquis. Le coût croissant des moyens d'investigation et de traitement pose des problèmes de plus en plus aigus aux pays développés, à tel point que l'on peut imaginer des décideurs peu enclins à favoriser une recherche dont les retombées risqueraient d'accroître les coûts de la santé.

### **Les enjeux scientifiques et technologiques : des synergies indispensables**

La compréhension des maladies passe par la poursuite des recherches dans le domaine du fonctionnement normal, au niveau de l'organisme, des tissus, des cellules, des molécules et des gènes. La connaissance du fonctionnement normal bénéficie aussi de l'étude des maladies. On ne peut donc pas soutenir qu'il existe d'une part une recherche fondamentale sur la physiologie, et d'autre part une recherche appliquée sur la pathologie, la recherche sur l'homme normal et la recherche sur l'homme malade progressent parallèlement et s'aident l'une l'autre.

### **Les enjeux humains et environnementaux : une évidence à conforter**

Les progrès dans les domaines physique, chimique et biologique ont, outre leurs retombées scientifiques propres et leurs effets positifs sur l'espérance de vie, des conséquences multiples qui expliquent l'implication croissante des sciences humaines et sociales dans le domaine. Tous les âges de vie, tous les niveaux de la vie sociale sont concernés. La société accorde une place croissante aux problèmes de santé, et il convient donc de s'interroger sur les rapports que la société entretient avec la santé.

De plus, les progrès scientifiques, dans un domaine dont l'être humain est l'objet, posent des questions qui ne s'étaient jamais posées auparavant avec cette acuité. Ceci explique les débats éthiques actuels dont il est souhaitable que les bases restent rationnelles et soient l'objet d'explorations épistémologiques,

La conjonction de ces facteurs explique la difficulté très particulière de la gestion de ce domaine où l'on constate la nécessité d'une multiplicité d'acteurs et de structures,

Les enjeux environnementaux sont peut être un peu moins patents. L'environnement est l'un des composants de la santé, et pas seulement du bien-être, ce qui suppose une véritable recherche en écologie de la santé dont on trouve quelques rares exemples. Le développement d'une écologie de la santé est directement pertinent du point de vue de l'individu et de la société, comme en témoignent les inquiétudes concernant les risques industriels, nucléaires et plus globaux (modification de la couche d'ozone, effet de serre...).

### **Les enjeux économiques et politiques : une question d'actualité**

A l'échelle d'un pays, la recherche en santé est source de développement économique, d'allonge-



ment de l'espérance de vie, mais aussi d'un alourdissement des charges collectives qui ne se traduit pas toujours directement en gain pour la santé individuelle et collective. Tous les partenaires ont donc intérêt à ce que le domaine soit mieux connu. Ceci inclut le fonctionnement du système de santé, ses effets et ses coûts, les conduites des soignants et des malades et leurs relations, les relations entre les soignants et la société, entre la santé et les autres aspects de la vie sociale, et, de façon plus générale, entre le public, les politiques, les médias et les médecins.

La dynamique de la recherche s'inscrit dans cette perspective. Il importe donc de réfléchir aux implications économiques, mais aussi sociales et politiques des innovations qu'elle engendre. La nécessité de l'évaluation de cette dynamique en terme de santé publique s'impose.

## 1 - BIOLOGIE ET MÉDECINE

### Génétique

#### *Lesenjeux*

- Le contrôle de la fidélité du maintien de l'information génétique apparaît comme un thème central. Ce contrôle permet d'aborder à la fois les processus de fidélité de la réplication et les processus où cette fidélité n'est plus assurée, soit en physiologie (évolution, diversité des gènes des immunoglobulines ou des récepteurs T), soit en pathologie héréditaire ou acquise.

- Le maintien de la compétitivité pour l'étude du génome humain : la France occupe la 3ème place mondiale (6 % de la production mondiale) après les Etats-Unis (50 %), la Grande-Bretagne (14 %), et avant le Japon (5 %).

- La localisation et l'identification des gènes responsables des pathologies génétiques ou à composante génétique. Cette approche est beaucoup plus

large que la simple définition biochimique. Elle s'appuie sur les cliniciens dans l'analyse des phénotypes. La relation recherche-hôpital est ici essentielle.

### **Evolution et tendances**

- *Pour les études du génome*, ce sont :

- le développement des outils informatiques indispensables à l'analyse des séquences et des alignements de marqueurs polymorphes. C'est à ce niveau que se situe l'actuel goulet d'étranglement qu'il importe de faire sauter par un investissement important;

- la coordination indispensable entre les groupes travaillant en France et à l'étranger;

- l'étude de la répartition des polymorphismes génomiques au niveau des populations humaines,

- *Pour les pathologies*, plusieurs groupes peuvent être identifiés :

- Les maladies génétiques et les cancers attribuables aux agents physiques et chimiques de l'environnement. La définition de populations à risque, la détermination des niveaux de sensibilité individuelle et le souci général de prévention nécessitent une meilleure connaissance du mode d'action des génotoxiques et des mécanismes de réparation de l'ADN lésé. Il existe des maladies génétiques rares, caractérisées par un défaut de réparation associé à une forte instabilité génique et/ou chromosomique, une hypersensibilité cellulaire à certains agents et une prédisposition au cancer : *Xeroderma pigmentosum*, ataxie télangiectasie et anémie de Fanconi. Des anomalies de la réparation ont été mises en cause dans certaines maladies dégénératives du système nerveux et dans les phénomènes de vieillissement précoce. Ce sont de bons modèles pour aborder ces problèmes.

- Les maladies monogéniques, dont la plus fréquente est la mucoviscidose, sont abordées par la localisation du gène responsable, puis son identification.

- Pour les maladies à déterminisme complexe, les travaux actuels tendent à identifier des facteurs génétiques de risque grâce aux approches moléculaires. La détermination des profils à risque dans des études géographiquement ciblées permet d'approcher les interactions entre gènes impliqués et facteurs environnementaux.

### ***Situation et perspectives***

Une quinzaine de groupes de recherche publics participent aux travaux sur le génome humain, parmi lesquels certaines unités INSERM ou CNRS sont situées au sein de structures privées (CEPH, Généthon). Une solution au niveau européen mériterait d'être envisagée. La cohésion et la complémentarité du GREG (Groupement de Recherche sur l'Etude des Génomes) avec les programmes "génom" de la Commission des communautés européennes, des autres pays européens, des Etats-Unis et du Japon sont essentielles.

On note une certaine démedicalisation due en particulier au mauvais positionnement de la cytogénétique, discipline peu encouragée, et à l'absence d'intégration au sein des mêmes structures de la génétique classique et de la biologie moléculaire. L'importance de la connaissance de la structure tridimensionnelle et de la fonction des protéines réclame des interfaces Génome/programme IMABIO. De même, les modèles de lignées transgéniques sont trop rares et leur développement est indispensable.

## **Les maladies infectieuses et parasitaires**

### ***Les enjeux***

Les maladies infectieuses demeurent une des préoccupations majeures de la santé publique au niveau mondial. C'est vrai dans le domaine de la microbiologie et de la virologie - en raison de l'extension du sida -, mais aussi de la forte mortalité persistante dans les pays en voie de développement, due à d'autres virus (rougeole).

C'est également le cas pour les maladies parasitaires, spécialement dans les pays du sud. Les bilharzioses, les filarioses, les leishmanioses, les trypanosomiasés et le paludisme sont responsables chaque année de la morbidité, de l'infirmité ou de la mort de plusieurs centaines de millions d'individus. Leur coût, ainsi que les pertes économiques qu'elles entraînent indirectement, se chiffrent actuellement en millions de dollars.

### ***Evolution et tendances***

Dans les pays en voie de développement, la lutte contre les maladies infectieuses s'inscrit dans le cadre plus large des relations santé-environnement en milieu tropical et réclame que soit prise en compte la diversité biologique : celle des agents pathogènes et des vecteurs, mais également celle des hommes. Ceci nécessite une approche interdisciplinaire incluant sociologues et anthropologues, si Ton veut faire état de l'influence des comportements et instruire des moyens de prévention.

Les mécanismes par lesquels les bactéries, les virus, en particulier celui du sida, les parasites échappent au contrôle immunologique de l'hôte ou acquièrent une résistance aux drogues représentent toujours un centre d'intérêt majeur.

Les bactéries et les virus sont également des outils de la recherche biologique et du progrès thérapeutique. L'étude des signaux moléculaires qui participent à l'organisation des chromosomes doit beaucoup à l'étude des microorganismes. La capacité à adresser un transgène en une cible déterminée du génome présente un immense intérêt. Les concepts de recombinaison homologue, reposent complètement sur les recherches développées auparavant sur des microorganismes. Des virus (rétrovirus, adénovirus) sont devenus un moyen pour introduire dans des cellules un gène dont on veut étudier les effets (voir *infra* "Thérapie génique"). L'amélioration des puissants outils de la biologie moléculaire repose

fortement sur la permanence des recherches fondamentales chez les microorganismes et les virus.

### ***Situation et perspectives***

*En parasitologie*, si les recherches concernant l'immunologie parasitaire (où certaines équipes françaises sont en pointe) doivent bien entendu être poursuivies, des études diversifiées à visées prophylactiques et thérapeutiques doivent être amplifiées. Malgré l'extension de sida dans les mêmes régions, le paludisme reste une préoccupation majeure du fait de l'adaptation remarquable du plasmodium aux agents thérapeutiques actuels et à l'incapacité d'éradiquer le vecteur. Tous les spécialistes déplorent l'insuffisance des efforts des pays développés dans ce domaine.

*En bactériologie*, les travaux menés pour comprendre l'interaction bactérie/hôte doivent être poursuivis, en particulier pour les mycobactéries. Les réarrangements majeurs observés entre souches virulentes et avirulentes doivent être analysés. Ce type d'étude aboutit aussi au développement de sondes utilisables en diagnostic.

*En virologie*, la recherche française tient une place de premier plan dans le domaine du sida. Par contre, l'étude de virus autres que ceux du sida tend à être négligée, alors que l'on peut prédire que d'autres virus émergeront et que l'on sait que d'autres sont déjà la source de pathologies très variées. Certains suscitent un intérêt croissant, comme le cytomégalovirus ou d'autres virus du groupe herpès, le virus de la rage et, plus récemment, l'association de virus et rétrovirus avec des maladies d'étiologie inconnue comme certaines maladies auto-immunes. La régulation des phénomènes de latence et d'infection chronique est au centre des préoccupations de plusieurs équipes.

L'importance des encéphalopathies spongi-formes subaiguës en terme de santé publique a sans doute été sous-estimée. Les maladies dégénératives transmissibles (Creutzfeld-Jakob et apparentées) sont d'autant plus préoccupantes que la natu-

re de l'agent infectieux reste inconnue. Il importe de stimuler avec un financement adapté les recherches dans ce domaine.

## **Biologie du développement. Reproduction. Endocrinologie**

### **les enjeux**

Le contrôle de la natalité est un enjeu humain, économique et politique de toute première grandeur à l'échelon de la planète, compte tenu des relations étroites entre contrôle de la natalité et développement socio-économique.

Les enjeux scientifiques essentiels sont, dans le domaine endocrinologique, la compréhension du mécanisme moléculaire d'action des hormones et l'élucidation des interrelations entre voies de transmission du signal chez les eucaryotes supérieurs. Dans le domaine de la biologie du développement et de la reproduction, ils concernent principalement la vaccination anti-fécondation et la fertilité.

### **Evolution et tendances**

Dans le domaine de l'endocrinologie, après les études de physiologie qui avaient abouti à la mise en évidence des hormones et des glandes endocrines, les travaux ont porté sur l'étude des récepteurs hormonaux, leur pharmacologie et la biosynthèse des hormones. Plus récemment, le clonage de nombreux gènes codant pour ces récepteurs a permis de les classer en familles, bouleversant en partie les acquis antérieurs. Les thèmes en émergence sont l'étude des récepteurs nucléaires et la pharmacologie des récepteurs membranaires.

Si l'étude du développement se prête bien à la recherche de modèles dont l'aspect moléculaire peut être analysé à partir d'organismes rudimentaires, en revanche celle de la reproduction s'en éloigne beaucoup par son niveau d'intégration physiologique, son caractère inabordable *in vitro* et par l'absence de modèle animal aussi riche et aussi



complexe que l'espèce humaine. Son retentissement sociologique a d'ailleurs été sans commune mesure avec la faible quantité d'enfants et de familles concernés. Or les besoins de santé publique en ce domaine ne cessent de s'élargir, requérant un investissement significatif au plan de la recherche fondamentale.

Sous son seul aspect contraception, la maîtrise de la procréation constitue une puissante source d'appel. Récemment c'est la contragestion, basée sur les progrès dans la connaissance des mécanismes d'action hormonale, qui a connu une certaine progression. Mais la quête de méthodes réversibles, dépourvues d'effets secondaires, à effet prolongé et peu coûteuses, est toujours aussi vive et insatisfaite. Certains groupes commencent à investir dans la contraception vaccinale, basée sur la mise au point de procédés antifécondation relevant de recherches fondamentales sur les interactions gamétiques et les fonctions des enveloppes de l'œuf.

### ***Situation et perspectives***

La biologie du développement est sans doute un des enjeux majeurs de la recherche biologique des dix prochaines années. Les perspectives relatives à l'étude du développement du zygote humain paraissent plus utilitaristes que fondamentales, essentiellement orientées vers l'identification génétique de l'embryon. Priorité devrait donc être donnée à une meilleure connaissance des gamétogènes mâle et femelle. Seule une meilleure connaissance des phénomènes situés en amont de la fécondation est en effet de nature à éclairer le processus de mise en route du génome embryonnaire au cours des étapes précoces du développement, et les succès apparents de la Procréation Médicalement Assistée n'ont fait que masquer l'ampleur des besoins de recherche en ce domaine.

En endocrinologie, la recherche française est d'excellent niveau en ce qui concerne les études sur les hormones à récepteur nucléaire (stéroïdes et rétinoïques en particulier), et de bon niveau, surtout sur le plan pharmacologique, en ce qui concerne les récepteurs membranaires.

## **Fonctions mentales, psychiatrie biologique et psychopharmacologie**

### ***Lesenjeux***

Ce qui est en jeu par l'intermédiaire d'une meilleure connaissance des mécanismes et des traitements des troubles neuro-psychiatriques, c'est un progrès général des neurosciences. Les travaux qui se développent actuellement dans le domaine des peptides, comme ceux qui portent sur les techniques d'imagerie cérébrale, tirent ainsi un large bénéfice des recherches cliniques. Dans le domaine de l'approche cognitive comportementale et de la recherche psychosomatique, les enjeux scientifiques ne se limitent pas à une meilleure compréhension des mécanismes de la cognition et des bases biologiques des interactions sociales; ils se situent également dans l'articulation entre l'observation cognitivo-comportementale et la connaissance de la physiopathologie

La connaissance plus fine des mécanismes d'apprentissage ou des dysfonctionnements cognitifs doit déboucher sur le perfectionnement des techniques de rééducation, chez l'enfant en difficulté comme chez le sujet atteint de lésions cérébrales, ou dans la démence type Alzheimer.

Une approche "psychophysiologique" ou "psychosomatique", au sens strict de ce terme, peut aussi permettre la définition d'indicateurs psychosociaux de risque pour des affections organiques, leur dépistage, leur prévention.

Il faut surtout insister sur la dimension sociale de ces recherches. Les problèmes de santé mentale et de handicap neurologique constituent un domaine extrêmement important en nombre de malades, en nombre de lits, en coût social et économique.

### ***et tendances***

Les recherches en neuropsychiatrie biologique ont connu un développement considérable à partir du moment où ont pu être identifiées comme li-

gands des molécules utilisées en thérapeutique. Nous disposons maintenant d'un nombre considérable de molécules, mais le passage de la recherche fondamentale à l'investigation clinique est de plus en plus difficile, faute de modèles animaux pertinents et en raison des obstacles éthiques qui s'opposent à une application trop directe à l'homme malade, 11 en résulte un hiatus croissant entre la recherche fondamentale et l'application thérapeutique.

De même, il reste beaucoup à faire en psychiatrie biologique. Une source importante de dynamisation provient de la confrontation des neurosciences avec le champ du traitement de l'information ou avec d'autres champs de la biologie : modélisation mathématique des réseaux neuronaux et intelligence artificielle, immunologie, avec les notions de réseau idiotypique ou avec l'accent mis sur la fonction primordiale de reconnaissance du soi.

### ***Situation et perspectives***

La situation française est très différente de celle, exemplaire, des Etats-Unis où un organisme unique (*National Institute of Mental Health*) couvre un large champ des neurosciences. La nécessité d'une véritable interdisciplinarité s'est manifestée par la mise en place du programme "Cognisciences". Ce programme devrait promouvoir la formation de chercheurs successivement au sein de plusieurs laboratoires, abordant des champs complémentaires, ou surtout des niveaux d'observation différents du même champ. Il faut toutefois être conscient des difficultés structurelles de cette ambition, et on doit regretter que les approches biologiques des cognitions ou des comportements laissent généralement dans l'ombre les interactions complexes entre le mental et le neurologique d'une part, et tous les autres champs de la physiologie d'autre part; beaucoup reste à faire pour le déploiement de disciplines d'interface.

L'importance d'un investissement dans le domaine de l'imagerie lourde (magnéto-encéphalographie) est soulignée par tous les spécialistes de la discipline.

## **Les cancers**

### ***Les enjeux***

Les enjeux scientifiques débordent largement le champ strict de la maladie cancéreuse. Etudier la maladie cancéreuse, c'est étudier les grands problèmes de la biologie comme ceux liés au développement, à l'endocrinologie, au système nerveux, à la génétique. C'est se pencher sur les mécanismes qui règlent la prolifération et la différenciation cellulaire.

Les autres enjeux sont également très importants, car les cancers sont des maladies dont le poids continue à croître tant sur le plan humain qu'économique. Ces dernières années, l'importance de l'épidémie de sida a contribué à sensiblement réduire son poids politique, mais pas pour autant l'intérêt qu'y porte la population et dont témoigne l'importance des fonds collectés pour la recherche par des fondations et associations privées.

### ***L'évolution et les tendances***

Ce sont les outils de la génétique moléculaire qui, en permettant de rechercher au sein de la cellule les gènes responsables du phénotype tumoral, ont permis de commencer à comprendre les mécanismes suivant lesquels une cellule devient cancéreuse. Identifier un gène, c'est généralement isoler son produit et en faire l'étude biochimique, fonctionnelle et structurale. Par les méthodes mises en jeu pour l'étude des protéines et de leurs pathologies, cette recherche est pluridisciplinaire, nécessitant l'intervention de plus en plus fréquente de biophysiciens, de chimistes, voire de physiciens.

Sur le plan thérapeutique, l'époque est caractérisée par la rareté des progrès spectaculaires tant en chimiothérapie qu'en radiothérapie. On voit surtout se développer les médicaments qui permettent une meilleure tolérance des chimiothérapies. Les principales avancées récentes sont représentées par l'utilisation des cytokines et la manipulation de la réponse anti-tumorale non spécifique.

## **Situation et perspectives**

Dans le domaine de la cancérologie la plus fondamentale, les laboratoires français sont de très bon niveau, et il y a souvent identité entre laboratoires de cancérologie moléculaire et laboratoires de génétique moléculaire fondamentale..

Les faiblesses concernent les domaines classiquement déficients en France, comme la biologie cellulaire.

## **Immunologie**

### **les enjeux**

L'immunologie a bénéficié récemment d'apports conceptuels qui en ont fait un champ disciplinaire aux bases fondamentales mieux définies. Par ses applications dans le cadre des différentes sciences se situant aux confins de sa problématique, l'immunologie fournit des modèles technologiques, mais également humains et économiques. L'émergence du sida positionne l'immunologie au carrefour de problèmes économiques, sociaux et environnementaux tout à fait nouveaux.

### **Evolution et tendances**

L'immunologie couvre un champ disciplinaire presque centenaire. Des spécialisations historiques ont distingué l'immunologie fondamentale et l'immunopathologie. D'une science restreinte, l'immunologie est devenue une discipline redéfinissant son intervention au niveau des mécanismes qui régulent l'homéostasie. Cette nouvelle étape a été rendue possible par l'analyse des bases moléculaires ou cellulaires de ses réponses, ainsi que par la compréhension, des mécanismes diversifiant la spécificité des récepteurs du système immunitaire et le démembrement, encore en cours, des cytokines impliquées dans l'induction et les arcs efférents de l'immunité. Les recherches doivent dorénavant s'intégrer plus intimement. Dépasant sa problématique initiale, l'immunologie est aujourd'hui un modèle d'analyse de questions impor-

tales de biologie générale. Des rencontres entre l'immunologie et la biologie cellulaire ont permis une redéfinition des mécanismes du trafic intracellulaire. De même, la biologie du développement se confronte à l'immunologie *et* utilise celle-ci comme un modèle d'étude très privilégié. Enfin, à tous les niveaux de l'analyse de la physiologie immunitaire, émerge le thème central des mécanismes de la transmission des signaux mitotiques. Cette approche analytique semble tout à fait comparable à celle des neurosciences ou de l'endocrinologie, et amène de nombreux immunologistes à explorer les connexions des molécules de surface impliquées dans les réponses immunitaires avec d'autres enzymes sous-membranaires ainsi que les composants du cytosquelette.

Les thèmes en émergence concernent en particulier l'étude de nouveaux mécanismes présidant à l'association des antigènes avec les complexes majeurs d'histocompatibilité, l'analyse des différents facteurs de croissance et leurs récepteurs, l'identification de nouvelles fonctions des protéines de surface, l'analyse du rôle développemental de différents produits géniques abordée par recombinaison homologue et transgénèse. Sur un plan moins fondamental émerge l'identification de marqueurs géniques de certaines affections. Ces recherches soulignent la complémentarité des approches menées dans les systèmes animaux ou humains. Sur un plan thérapeutique, les progrès de l'immunologie ont permis une meilleure compréhension de la pharmacologie de la réponse immunitaire grâce à l'utilisation appropriée d'anticorps monoclonaux à des fins diagnostiques ou thérapeutiques.

### **La situation**

La recherche en immunologie en France occupe une position relativement favorable. Parmi ses points forts, il faut remarquer une bonne intégration de certaines recherches fondamentales dans le cadre de laboratoires importants permettant l'abord pluridisciplinaire des problèmes. Cependant l'immunologie souffre, comme d'autres disciplines biologiques, d'un poids insuffisant par rapport à l'ensemble de la recherche fondamentale en France. La



biologie moléculaire n'est pas encore suffisamment utilisée. Certains "trous" dans le panorama des thèmes de recherche abordés en immunologie sont patents. C'est le cas des cytokines et facteurs de croissance qui ne sont étudiés que dans quelques laboratoires.

La vocation du CNRS est d'assurer un lien entre l'immunologie et d'autres disciplines connexes. Les progrès majeurs résulteront certainement de l'intégration avec d'autres disciplines. Ce rôle très spécifique du CNRS doit être renforcé. Il ne doit pas exclure les nécessaires liens permettant l'intégration des recherches fondamentales avec divers secteurs hospitaliers. L'émergence récente de "forces de frappe" importantes dans le secteur privé, confronte certains laboratoires publics à des choix stratégiques difficiles.

## **Les grands systèmes (circulation, respiration, digestion,...)**

### **Les enjeux**

Les recherches sur la physiologie et la pathologie de systèmes intégrés sont peu développées actuellement. Elles sont cependant le préalable à des recherches en physiopathologie et le fondement des modèles de pharmacologie.

Les enjeux de santé publique et économiques sont essentiels, s'agissant en particulier, compte tenu de leur fréquence, des maladies cardiovasculaires.

### **Evolution et tendances**

La physiologie d'organes a fait progressivement place à la physiologie cellulaire. Cette évolution explique que les limites de la physiologie sont moins précises et que de nombreuses zones de recouvrement existent entre physiologie, biologie cellulaire, biochimie et immunologie. De plus, dans le choix des thèmes étudiés intervient souvent plus le souci d'appliquer une technique dans plusieurs domaines que la volonté d'aborder une problématique.

Parmi les nombreux thèmes en émergence, il faut citer en particulier :

- les modifications des structures et fonctions d'organes au cours de l'ontogenèse, du développement et du vieillissement;
- les modifications des fonctions d'organes dans les conditions normales et pathologiques;
- les mécanismes responsables des communications entre cellules : médiateurs, molécules d'adhésion, l'interaction ligand-récepteur, la transduction du signal;
- les mécanismes responsables des flux ioniques à travers la membrane plasmique dans les conditions normales et pathologiques.

### **Situation et perspectives**

L'essentiel du champ dans le domaine de la pathologie est couvert par l'INSERM. Cependant les laboratoires du CNRS peuvent également apporter une importante contribution grâce à la multidisciplinarité de l'organisme. Un bon exemple peut en être fourni par la recherche dans le domaine cardiovasculaire.

### **Physiologie et physiopathologie**

Beaucoup de travaux ont été consacrés aux différents types cellulaires qui constituent les vaisseaux et le cœur. Les années à venir devront voir une meilleure connaissance des gènes qui contribuent à la fonction spécifique de chacune de ces cellules, et des mécanismes de transduction du signal induit par différents médiateurs.

Les modèles animaux sont essentiels autant pour l'exploration des maladies génétiques que pour les travaux de pharmacologie et de physiologie. Les lignées de rats hypertendus ont fait la preuve de leur utilité pour la localisation des gènes impliqués dans la régulation de la pression artérielle. La création de lignées d'animaux transgéniques et congéniques est indispensable. Elles seules permettent d'évaluer *in vivo* l'effet des mutants de régulation.

## *le médicament*

La conception du médicament doit permettre de mettre à profit les concepts et les données structurales et fonctionnelles recueillies par la recherche fondamentale. Cette recherche devrait utiliser des compétences variées, présentes dans les différents départements du CNRS et dont la coopération devrait être incitée : modélisation, synthèse organique, analyse de structure, études pharmacologiques.

## *Thérapeutiques substitutives*

La réalisation de prothèses et d'organes artificiels nécessite la conception de biomatériaux, la modélisation de la fonction à suppléer et les moyens d'analyse du matériel réalisé et implanté dans des modèles animaux. Une interaction étroite entre physiciens, chimistes et médecins est une nécessité absolue.

## **2 - IMAGERIE, RAYONNEMENT ET BIOMÉCANIQUE**

### **Les enjeux**

#### ***Imagerie***

L'imagerie médicale est un secteur économique en forte expansion, car l'introduction de nouvelles techniques associées à des systèmes informatiques performants permet d'assurer un diagnostic de plus en plus précoce et d'effectuer sans danger des contrôles efficaces.

Le marché mondial sera supérieur en 1992 à 8 milliards de dollars. Dans ce marché, l'imagerie ultrasonore et l'imagerie par résonance magnétique, techniques les plus récentes et les plus évolutives, sont en forte expansion et représentent respectivement 22 % et 19 % du total.

## ***Effets des rayonnements ionisants, thérapie et espace***

La recherche fondamentale en physique nucléaire suscite le développement d'accélérateurs fournissant des faisceaux de protons et d'ions lourds d'énergie égale à plusieurs dizaines ou plusieurs centaines de MeV par nucléon. Une extension des recherches utilisant ces particules vers la biologie est un enjeu important, principalement dans la lutte contre les cancers.

## ***Biorhéologie et fluides biologiques***

La connaissance du comportement biorhéologique et mécanique des fluides biologiques est essentielle, compte tenu de l'impact actuel des maladies cardiovasculaires : compréhension de la circulation, mise au point, de tests sur prothèses, fractionnement *in vitro* des fluides biologiques.

## **Situation, évolution et tendances, thèmes en émergence**

### ***Imagerie médicale***

#### *imagerie ultrasonore*

Les ultrasons ont pris une place de première importance en imagerie médicale. Leurs avantages sont l'aspect non invasif, le relatif faible coût, la possibilité du temps réel qui en font souvent un examen de première intention. Si l'historique des ultrasons a d'abord amené à développer parallèlement deux types d'applications d'imagerie échographique et la mesure de vitesses par effet Doppler), les deux techniques sont maintenant étroitement couplées au sein d'appareils uniques.

De nombreuses voies de recherche demeurent ouvertes pour optimiser ces techniques.

- Amélioration de la qualité de l'image.
- Nouvelles modalités d'applications, avec les

approches quantitatives et l'imagerie tridimensionnelle C3D).

Il convient également de mieux étudier l'aspect fondamental des interactions ultrasons-tissus et, en amont, les applications thérapeutiques.

### *Imagerie par résonances magnétique nucléaire*

L'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) a maintenant montré son utilité diagnostique dans certaines pathologies, car elle présente beaucoup d'avantages : accessibilité à 5 différents paramètres (densité de noyaux d'hydrogène, temps de relaxation, vitesse de diffusion ou d'écoulement), absence de nocivité, bonne adaptation à l'acquisition tridimensionnelle des données.

L'inconvénient majeur est le prix actuel des examens. L'emploi généralisé de cette technique passe donc par la mise au point d'une génération d'appareils économiques.

L'introduction de l'IRM semble très prometteuse dans différents domaines qui restent à explorer : l'angiographie, le contrôle du déplacement d'une sonde chirurgicale en stéréotaxie, l'établissement d'une carte des températures en hyperthermie laser, hyperfréquence ou ultrasonore, l'imagerie locale à très haute résolution spatiale, l'imagerie cardiaque en temps réel.

### *Autres méthodes d'imagerie*

Un effort doit être poursuivi pour mettre en oeuvre ou perfectionner d'autres méthodes, en particulier, celles qui utilisent les hyperfréquences ou la détection directe des champs magnétiques biologiques (magnétocardiographie ou magnétoencéphalographie).

### *Recherche et développement informatiques pour l'imagerie médicale*

Il faut développer des moyens informatiques performants pour le traitement et l'analyse d'images, le calcul des paramètres fondamentaux,

la comparaison des images obtenues à partir de différentes modalités d'examen, la présentation adaptée des données tridimensionnelles et le transfert rapide des images.

## ***Effets des rayonnements ionisants, thérapie et espace***

Les faisceaux de particules chargées à transfert d'énergie linéique (TEL) élevé (protons, ions lourds) déposent la majorité de la dose à la fin de leur parcours. Cet aspect balistique et l'efficacité biologique relative plus élevée que celle des radiations conventionnelles permettent de développer des techniques de radiothérapie plus performantes pour le traitement de certains cancers. En outre, l'existence dans l'espace de particules à TEL élevé pose le problème du risque biologique lors des missions spatiales de longue durée.

### *Physique nucléaire et physique atomique*

Nous manquons de données expérimentales sur les collisions nucléaires et de codes de fragmentation décrivant l'évolution des faisceaux d'ions lors de la traversée du tissu vivant. Des expériences doivent donc être programmées auprès des accélérateurs d'ions lourds.

### *Physique du solide*

Un travail de recherche intensif est mené pour préciser le processus de formation de traces dans la matière, décrire la structure de ces traces et avancer ainsi dans une meilleure compréhension des effets biologiques des ions lourds.

### *Radiobiologie et médecine*

Il est nécessaire de poursuivre les travaux concernant la mesure des efficacités biologiques relatives, la cinétique de la prolifération ou de la régénération cellulaire, la radiosensibilité des tissus pauvres en oxygène pour parvenir à une bonne compréhension théorique et à une modélisation correcte des effets biologiques sur les cellules, tissus et organes. La poursuite des programmes nu-



cléaires civils et les risques persistants de conflits nucléaires, de même que les retombées thérapeutiques, justifient un investissement plus important dans ce domaine.

#### *Autres méthodes de radiothérapie*

Les études sur les autres méthodes de radiothérapie (neutrons, pions) et le développement futur des méthodes de radiothérapie classique doivent être poursuivies en parallèle.

#### *Développement des facilités*

Une grande partie des travaux de recherche utilise des accélérateurs conçus au départ pour des expériences de physique, Saturne et Orsay en France. Les expérimentations doivent se poursuivre auprès de ces machines. Cependant des machines spécialement destinées à la biologie et à la médecine devront être prévues, si les travaux sur les ions lourds montrent des avantages concrets.

#### **Biorhéologie et fluides biologiques**

Les travaux de base en France dans ce domaine sont très actifs, convergeant sur le thème de la biomécanique des fluides, que ce soit la modélisation rhéologique du globule rouge, ou celle, plus globale, du sang dans les micro-vaisseaux. Dans le secteur de la biomécanique cardiovasculaire, les équipes françaises étudient, en particulier, la dynamique des écoulements dans des bifurcations. Des bancs de tests de prothèses valvulaires très performants sur le plan international ont été développés.

Les procédés membranaires de filtration tangentielle prennent une place croissante et remplacent progressivement des techniques de centrifugation ou de filtration frontale classique. Les secteurs concernés sont la microfiltration et le fractionnement du sang ainsi que l'épuration extra-rénale.

Les thèmes de recherche en émergence dans ce secteur sont l'hémorhéologie et l'hémodynamique dans les géométries de petite taille, la modélisation des écoulements appliquée aux pontages

artériels, le développement de prothèses valvulaires et cardiaques (un projet national de développement de cœur artificiel est à l'étude), l'amélioration des procédés de séparation membranaire, l'étude des interactions protéines-membrane.

### **Situation et perspectives**

Un certain nombre d'équipes nationales sont d'excellent niveau. Certaines utilisent de grands équipements. Des firmes françaises sont bien implantées dans le marché international. Les créneaux identifiés sont indispensables au développement harmonieux de la recherche et au maintien de l'industrie française dans ces secteurs en plein développement.

Il paraît souhaitable de créer un ou deux centres d'excellence d'envergure européenne dotés de moyens lourds (PETSCAN, cyclotron médical, imagerie, spectroscopie RMN, rayons X et magnéto-encéphalographie.

## **3 - MÉDICAMENTS ET NOUVELLES THÉRAPEUTIQUES**

### **La conception des médicaments**

Le médicament joue un rôle crucial en thérapeutique. La conception des médicaments fait intervenir de nombreuses disciplines : médecine, pharmacie, chimie, physico-chimie, ... : c'est par essence une science pluridisciplinaire.

#### **Les enjeux**

- Le plus important est la conception de nouvelles molécules, particulièrement dans les domaines des analgésiques non-addictifs, des antitumoraux, des antiviraux (particulièrement ceux impliqués dans la lutte contre les rétrovirus), mais aussi des antibactériens et des antiparasitaires en raison du développement des phénomènes de résistance. Une préoccupation importante concerne

le traitement des démences séniles (en particulier la maladie d'Alzheimer). La mise au point de substituts et/ou d'antagonistes non addictifs des substances conduisant aux toxicomanies doit être une préoccupation prioritaire.

- La vectorisation des principes actifs, car plusieurs moyens nouveaux de vectorisation apparaissent : liposomes, nanoparticules...

- Le dépistage et le diagnostic précoces des maladies, par l'utilisation de test biochimiques simplifiés, permettent d'alléger les procédures thérapeutiques,

- La place de la pharmacologie. Une des caractéristiques fondamentales de la pharmacologie moderne est la prépondérance de la biologie en amont et en aval de l'ensemble des processus qui conduisent à l'élaboration d'une molécule active, Il est à prévoir que la pharmacologie deviendra essentiellement un sous-produit (au sens non péjoratif) des recherches effectuées par des biologistes, des structuralistes et des chimistes organiciens.

## Evolution et tendances

La plupart des molécules actives actuellement utilisées en thérapeutique sont issues d'une approche empirique ou semi-empirique. L'approche expérimentale des vingt dernières années était basée sur le concept de relation structure chimique/activité pharmacologique. À partir d'une molécule active, d'origine naturelle ou synthétique, souvent découverte un peu par hasard, étaient synthétisés une multitude de dérivés structuralement voisins, L'apparition de ces familles de molécules a eu l'avantage de permettre une meilleure compréhension des mécanismes d'action pharmacologiques et a donné naissance, dans certains cas, à des composés plus actifs. Il reste indispensable de poursuivre la recherche de nouvelles substances bioactives à partir de sources naturelles (plantes, microorganismes, animaux terrestres ou marins...) à partir desquelles ont été isolés, ces dernières années, de nouveaux immunosuppresseurs et de nouveaux anti-cancéreux.

Cependant, à l'empirisme et au criblage de milliers de molécules, tend à se substituer une approche conduisant à la conception de structures moléculaires qui interagissent d'une manière aussi sélective et efficace que possible avec la cible, La mise en œuvre de cette stratégie nécessite un certain nombre d'étapes qui schématiquement peuvent se résumer ainsi :

- *La caractérisation des cibles.* Cela implique une meilleure caractérisation structurale de ces cibles par l'utilisation de la résonance magnétique nucléaire haut champ multidimensionnelle, *in vivo*,... D'autres techniques sont également utilisées : la spectrométrie de masse, la diffraction des rayons X, le clonage des récepteurs, la modélisation moléculaire,...

- *Les moyens de synthèse.* La synthèse organique occupe une position-clé. Les synthèses multiétapes sélectives sont de plus en plus utilisées. On peut noter l'utilisation renforcée de la chimie enzymatique, en particulier des abzymes.

- *Les nouvelles formes d'administration des médicaments.*

## La situation

La France avait une position de premier plan dans le médicament. Elle accuse un certain recul ces dernières années. Ainsi les dernières grandes classes thérapeutiques sont le fait de l'étranger (particulièrement des Etats-Unis). L'investissement du secteur public reste insuffisant. Il manque de structures pluridisciplinaires, regroupant par exemple des chimistes et des biologistes; cela peut être attribué à l'insuffisance du financement d'incitation aux programmes interdisciplinaires. Toutefois l'effort porté au programme IMABIO est notoire et suffisant.

## Les biothérapeutiques

### Les enjeux

Les biothérapeutiques se basent sur une action directe au niveau des processus biologiques

fondamentaux par des substances identiques ou extrêmement voisines de celles qu'utilisent la nature. Les enjeux scientifiques, médicaux, économiques sont considérables. Pour le seul domaine des cytokines, les estimations des industriels portent sur un marché mondial de 3 milliards de dollars en 1997. La thérapie génique n'en est qu'à ses balbutiements, mais représente certainement un des enjeux majeurs des années à venir, en particulier dans le domaine du traitement des maladies monogéniques.

### **Evolution et tendances**

Trois applications principales de la biothérapeutique sont identifiées :

- *La production de protéines naturelles par les techniques du génie génétique.* Cette technologie a permis en quelques années la mise sur le marché des interférons, de l'érythropoïétine, et du facteur de croissance des polynucléaires neutrophiles, bientôt de facteurs de la coagulation et d'autres facteurs de croissance.

- *La modulation de l'expression génétique.* Elle pourrait être obtenue par l'inhibition de l'expression de certains gènes par des oligonucléotides synthétiques, et agissant comme antimessager (stratégie "anti-sens")- Une activité antimessager sélective peut également être obtenue par l'utilisation des propriétés catalytiques des oligoribonucléotides induisant des coupures sur un mRNA (ribozymes). Un autre cas de figure est celui où un oligonucléotide naturel ou fonctionnalisé de séquence homopurique ou homopyrimidinique s'hybride au niveau de sa séquence complémentaire sur un ADN double brin pour former une tripe hélice entraînant une inhibition de la transcription (stratégie "anti-gène")- La possibilité d'inhiber sélectivement l'expression de certains gènes est d'un intérêt majeur. On peut imaginer agir par ce biais sur la différenciation et sur certaines caractéristiques phénotypiques. Ainsi l'extinction de l'expression d'un oncogène transformant pourrait conduire à la réversion phénotypique de la cellule maligne vers la cellule normale.

- *La thérapie génique.* La problématique est inverse de la précédente. Dans ce cas, on va tenter d'introduire et de faire exprimer dans l'organisme un gène déficient ou un gène de résistance (aux chimiothérapies anticancéreuses dans les cellules hématopoïétiques, au virus du sida dans les cellules CD4). Le gène concerné peut être inséré par des techniques de biologie moléculaire dans un génome de virus infectieux mais non pathogène. L'utilisation de vecteurs viraux pose cependant un certain nombre de problèmes, et des solutions alternatives apparaissent indispensables. Dans ce but, des recherches concernant la vectorisation d'ADN fonctionnels par des liposomes ou des nanoparticules sont en développement croissant.

### **Situation et perspectives**

Dans le domaine de la production industrielle des protéines recombinantes, la France accuse un retard considérable qui reflète sans doute surtout l'insuffisance des recherches dans le domaine de la physiologie de ces protéines. L'insuffisance des investissements des firmes pharmaceutiques françaises est probablement également en cause.

La recherche dans le domaine de la thérapie génique est assez bien développée, avec quelques équipes au tout premier plan international. Toutefois un effort national beaucoup plus important apparaît maintenant nécessaire dans ce domaine aux applications pratiques potentielles considérables- Les difficultés techniques à résoudre sont cependant nombreuses, car il faut assurer l'introduction du gène dans un nombre suffisant de cellules à durée de vie longue, et l'expression de gène à un taux élevé, ce qui nécessite une excellente connaissance de sa régulation.

## **Les bioprocédés**

### **Les enjeux**

Ils sont d'ordre économique (outils de production), scientifique (instrument de recherche fondamentale), médicaux (nouvelles méthodes de traitement de certaines maladies).



## **Evolution et tendances**

### *Cultures cellulaires in vitro en pharmacologie et thérapie*

C'est un outil essentiel dont les applications sont nombreuses.

La production d'anticorps monoclonaux et des protéines recombinantes devrait être multipliée par quatre les dix prochaines années, le critère de qualité devient primordial et les réglementations de mise sur le marché demandent des caractérisations de plus en plus fines.

La thérapie cellulaire se développe rapidement. Une fois l'efficacité de ces méthodes démontrée, leur extension imposera la mise en œuvre de modes de propagation des cellules *in vitro* plus rapides et plus sûrs.

Les études de pharmacotoxicologie conduisent au développement, de la culture en masse de cellules animales différenciées. Les travaux récents démontrent la possibilité d'améliorer le comportement de ces cellules en culture par une meilleure maîtrise des facteurs d'environnement biochimique et physique, et ils bénéficient des collaborations entre des spécialistes de la toxicologie, du métabolisme des médicaments, des cliniciens et des équipes de génie biochimique.

De nouvelles stratégies de production de molécules actives par cultures de cellules végétales sont aussi envisagées. Ce type de production apparaît particulièrement attractif pour des plantes dont l'exploitation pourrait mettre en danger la survie de l'espèce.

### *Organes et tissus artificiels*

C'est un domaine en évolution rapide, aussi bien pour la création de nouvelles prothèses colonisables que pour la mise en œuvre d'organes hybrides utilisant des cellules. Dans ces systèmes, il est essentiel de maîtriser les matériaux utilisés et de fournir aux cellules un environnement qui leur per-

mette de conserver le plus longtemps possible leurs fonctions spécifiques. La culture de cellules représente également un moyen d'élaborer des tissus artificiels (peau, os, etc.).

## **Situation et perspectives**

### *Cultures cellulaires in vitro en pharmacologie et thérapie.*

La culture en masse de cellules animales pour la production de molécules thérapeutiques est déjà mise en œuvre par toutes les grandes sociétés pharmaceutiques françaises. Cependant on peut regretter que la part de la recherche fondamentale soit aussi faible en regard de ce qui existe ailleurs. Le maintien de la situation française dans ce secteur doit donc mobiliser des moyens à la fois publics et privés en favorisant les synergies entre ces deux secteurs.

La maîtrise de la culture de suspensions cellulaires végétales en vue de développer l'insertion de gènes hétérologues et d'optimiser la production de molécules d'intérêt thérapeutique bien identifiées doit faire l'objet de recherches plus soutenues.

### *Organes et tissus artificiels*

Les objectifs prioritaires sont la mise au point de matériaux biocompatibles permettant la prolifération cellulaire, en même temps que la recherche de membranes dont les caractéristiques de sélectivité, d'interaction avec les molécules biologiques et d'écoulement soient bien maîtrisées.

## **Thérapeutiques modernes et sociétés**

Plusieurs disciplines des sciences humaines et sociales se sont intéressées aux questions posées par les thérapeutiques médicamenteuses. Jusqu'à présent, ont été essentiellement mobilisées l'histoire, l'anthropologie, la sociologie (concernée par certaines recherches sur les incidences de nouveaux médicaments sur la vie des patients, et sur le recours et le retour aux médecines "tradition-

nelles"), les sciences juridiques (qui s'interrogent sur l'évolution du statut du médicament), et enfin l'économie, qui étudie les répercussions.

Il paraît indispensable d'intéresser davantage les sciences humaines et sociales aux problèmes posés par les thérapeutiques médicamenteuses contemporaines. Le médicament est devenu un objet que ne peuvent ignorer l'économie, les sciences politiques, la sociologie, la psychologie etc. En effet, les médicaments, de leur élaboration à leur consommation, en passant par le financement des recherches, la mise au point des filières technologiques, leur remboursement par le système de protection sociale, sont devenus un enjeu considérable du système de santé (demande des malades, ajustement des stratégies des firmes pharmaceutiques, modalités des essais thérapeutiques, choix en incertitude, mode de consommation, recours à l'automédication, etc.).

## 4 - SOCIÉTÉS ET SANTÉ

### Les enjeux

Il existe une demande croissante d'intervention des sciences humaines et sociales (SHS) dans la définition et la gestion des problèmes de santé. En effet, révolution rapide des connaissances biomédicales, les problèmes éthiques posés par cette évolution, la technologisation des thérapeutiques, les questions d'adaptation des comportements aux nouvelles données, sollicitent l'interrogation des SHS à côté des sciences biologiques, chimiques, physiques.

Des facteurs psychologiques, comportementaux, sociaux et culturels jouent un rôle important dans l'émergence des maladies (transmissibles ou non), dans la perception par les usagers des techniques médicales et de leur utilisation, dans l'observance par les populations des prescriptions et des conseils issus des campagnes d'éducation. Il est donc souhaitable que les spécialistes de ces do-

maines participent plus activement à l'élaboration et à l'évaluation des politiques de prévention.

Les progrès théoriques et méthodologiques dans toutes les disciplines peuvent bénéficier de l'apport des SHS. Ainsi l'insuffisance des modèles théoriques classiques en économie pour traiter de la santé appelle des réflexions fondamentales et l'ouverture d'approches novatrices. Les problématiques soulevées par révolution médicale impliquent une plasticité de la part des SHS dont on peut attendre un enrichissement conceptuel et une contribution essentielle au décloisonnement des disciplines.

### Evolution et tendances

C'est à partir des années soixante-dix que, d'une façon générale, les diverses disciplines des SHS se sont mobilisées sur les questions de la médecine, de la maladie et de la santé. Ainsi l'histoire, dans le sillage de la démographie historique et de l'histoire sociale, développe une histoire de la santé. Etudiant avant tout la "médicalisation" de la société, ses études ont essentiellement porté sur l'offre de soins et sur son évolution (histoire sociale des professions de santé, des réseaux de soins, des rapports Etat-médecine, des causes de décès). Dans la tradition de l'histoire et de la philosophie de la médecine française, mais aussi en liaison avec le courant plus empirique de la sociologie des sciences, un champ de recherche se dessine qui a pour objet les connaissances et les pratiques médicales.

La sociologie a porté son attention sur cinq domaines prioritaires. La sociologie de la maladie s'est intéressée, avec la psychologie sociale et la psychologie de la santé, aux "représentations sociales" du corps de la santé et de la maladie, aux pratiques microsociologiques (interaction médecin/patient, gestion de la maladie), aux comportements de soins. Ou point de vue de l'éthique et de la morale, elle étudie les débats sur les problèmes juridiques posés par les évolutions de la médecine comme elle travaille sur les choix éthiques auxquels sont confrontés les professionnels de santé. Dans le

cas du risque et des comportements de prévention, elle contribue, avec d'autres disciplines, à l'évaluation des risques. Enfin, traitant du rapport santé-travail, elle s'intéresse aux effets des conditions de travail sur la santé, ainsi qu'aux comportements des salariés par rapport à ces conditions.

Dans les sciences du langage et de la communication, outre sa contribution à l'étude de la pathologie du langage, de son acquisition et de son développement, les études ont porté sur les figures du discours sur la santé et sur la maladie, sur l'interaction médicale soignants/soignés et sur les formes de transmission des savoirs médicaux et leurs effets.

L'anthropologie a porté ses vues sur les systèmes de représentation du corps, de la maladie et de leurs inter-relations avec l'organisation sociale et symbolique des sociétés considérées. Depuis quelques années apparaît une nouvelle tendance vers des études plus concrètes, en collaboration avec les sciences de la vie et les organisations de santé publique, où l'approche ethnologique des modes de vie et des comportements est combinée avec des enquêtes médicales, biologiques et épidémiologiques.

La géographie permet d'étudier les interactions entre l'environnement, le système de soins, et une batterie d'indicateurs révélateurs de ces interactions. Elle étudie les conséquences de l'aménagement de l'espace sur la répartition géographique, l'exposition différentielle des populations aux maladies et leur accès au système de soins.

En psychologie, l'attention porte sur les processus de développement de l'individu et de son adaptation aux conditions de vie, aux contraintes de l'environnement matériel et social, ainsi qu'aux effets psychosomatiques de leurs dysfonctionnements. On s'intéresse également aux transformations induites dans le fonctionnement psychologique par l'augmentation de l'espérance de vie.

En droit, un intérêt systématique pour le phénomène médical s'est manifesté dès la fin du XIX<sup>e</sup>

siècle avec l'émergence de la notion de responsabilité médicale. Ont ensuite été étudiés le contrat médical, les institutions, le statut de la personne malade et hospitalisée, et enfin l'expérimentation sur l'homme. Des thèmes, du fait de leur nouveauté et de leur importance, commencent à être abordés : le droit de la sécurité sociale, le statut du médicament et de l'outil de diagnostic.

En économie, les résultats classiques de la théorie économique sont très difficilement utilisables dans le domaine de la santé, domaine très particulier qui, pourtant, ne peut s'affranchir des contraintes économiques. De nombreux travaux ont bien décrit ces particularités, sans pour autant avoir proposé une théorie qui permette une bonne régulation de ce secteur. Les recherches se poursuivent en faisant appel à la théorie de la bureaucratie ou de l'agence, mais les hypothèses sur lesquelles reposent ces nouveaux développements ne font pas encore l'objet d'analyses économétriques, faute de disposer d'une information construite et fiable.

## Situation et perspectives

En dehors du cadre de quelques grandes formations, les chercheurs du CNRS travaillant sur les thèmes corps, santé, maladie, médecine, biologie et génétique des populations sont dispersés dans une quarantaine d'unités de recherche qui consacrent une partie de leur programme à ces objets. Diverses disciplines des SHS sont ainsi concernées par le thème santé et thérapeutiques. Il faut toutefois noter que certaines d'entre elles sont plus représentées à l'université qu'au CNRS et souffrent d'un certain isolement. Pour autant, la majorité des chercheurs travaillent en collaboration avec d'autres équipes (ORSTOM, INSERM, INED, Université, etc.) et en réponse à la demande sociale et aux incitations d'organismes publics (ministères, association à but non lucratif, DDASS, ORS, organismes internationaux, etc.).

Il apparaît nécessaire de renforcer la situation de la recherche française par rapport à celle de la communauté scientifique internationale où des pro-



grès ont été soulignés dans les domaines de l'anthropologie, de la géographie, de la psychologie, de la sociologie, de l'histoire. Ceci, devrait se traduire par un effort de soutien et d'encouragement à l'ensemble de ces disciplines,

- Les *thèmes déjà explorés* doivent continuer à être soutenus en raison de leur importance sociale et scientifique. En raison, en particulier, des dimensions culturelles et sociales du recours aux soins et des pratiques thérapeutiques, c'est le cas des thèmes suivants ;

- influence des représentations, des modes et des habitudes de vie, des modèles culturels sur le maintien de la santé et sur le développement de certaines pathologies;

- modalités d'accès aux soins (problème de réception des politiques de prévention et de soins, blocage culturel, recours aux diagnostics et aux thérapeutiques "traditionnels" ou "alternatifs");

- valeurs socio-culturelles déterminantes dans le cadre d'une épidémiologie des maladies transmissibles ou non (rôle des comportements alimentaires, sexuels, de la consommation de produits toxiques, etc.);

- dysfonctionnements de la communication interculturelle entre soignants et soignés.

- Des *thèmes en émergence* devraient être l'objet d'un effort accru des chercheurs avec le soutien de l'institution.

- La perception et la définition du "statut de malade" évolue, tant chez ce dernier que chez les soignants. L'émergence du malade, non plus comme seul "patient" mais comme acteur, et des associations comme porte-parole de revendications sociales diverses est un phénomène qui ne concerne qu'un nombre limité de pathologies dans les pays développés. Il pose une série de questions comme leur participation aux choix thérapeutiques et aux décisions en situation de relative incertitude, l'implication de leur inclusion dans les essais cli-

niques, leur engagement dans des débats publics, dans la formulation des besoins des usagers. Cela conduit à s'interroger sur le rôle de ces acteurs dans la définition des enjeux éthiques, stratégiques, thérapeutiques, voire financiers.

- Les impératifs économiques et gestionnaires, les évolutions des technologies médicales, le développement de nouvelles filières de soins, la concurrence entre l'hôpital public et les cliniques privées, les relations entre la médecine hospitalière et celle de ville entraînent une série de transformations du système de soins français sur lesquelles il serait nécessaire de promouvoir plus d'études. Ces modifications posent, entre autres, des questions relatives aux rapports au sein des équipes soignantes, aux problèmes liés aux fonctions, rôles, statuts, carrières des personnels de santé.

- L'importance accordée à la santé par notre société et l'intensité des débats qu'elle suscite a pour corollaire une large médiatisation tant de l'évolution des connaissances bio-médicales que de certains dysfonctionnements du système de soins. L'interrogation devrait porter sur le rôle des médias dans la diffusion de certaines connaissances scientifiques (ce qui pose la question plus large de la vulgarisation), sur l'impact qu'ils ont dans la sélection de certaines maladies et le poids qu'ils font ainsi, indirectement, peser sur la recherche fondamentale, sur les exigences sociales relatives à l'efficacité thérapeutique (aspect contradictoire entre une relative crise de confiance dans la médecine "scientifique" et l'exigence de résultats).

- L'approfondissement des savoirs en génétique et en biologie moléculaire soulève certaines questions que les SHS contribuent à mettre en évidence : passage de la recherche fondamentale aux applications humaines, gestion des banques de données génétiques, choix des orientations de recherche.

# QUELQUES GRANDS CHANTIERS

## 1 - LE SIDA

Le sida va rester, encore pour de nombreuses années, une préoccupation majeure comme le montrent l'extension rapide de l'infection dans de nombreuses régions du globe et la modicité des résultats obtenus pour le moment dans le domaine du traitement curatif et de la prévention. La recherche en prévention, la mise au point d'un vaccin, la découverte de nouveaux antiviraux, les tentatives de thérapie génique doivent, continuer à mobiliser les chercheurs. De plus, tous les efforts dans ce domaine spécifique ont eu et auront encore des retombées multiples (prévention d'autres maladies infectieuses, traitement d'autres maladies virales, meilleure compréhension du fonctionnement cellulaire en général et des cellules lymphoïdes en particulier).

En France, la création en 1989 de TANKS a représenté une réponse originale et qui semble à la dimension du problème posé par un problème de santé publique impliquant une large palette de chercheurs. Les effets bénéfiques ont été indiscutables en terme d'incitation et de coordination des recherches, et rapidement mesurables dans le domaine des essais thérapeutiques. Il est encore trop tôt pour faire un bilan des conséquences de cette création dans le domaine de la recherche biologique et encore plus prématuré de réfléchir au modèle de structure d'orientation scientifique que représente l'Agence.

Pour les sciences de l'homme et de la société, l'ANRS a représenté un facteur essentiel de mobilisation. Les travaux couvrent un éventail disciplinaire assez large, mais l'analyse quantitative des recherches financées par l'ANRS révèle un déséquilibre entre deux domaines : celui de la recherche en

amont de la prévention, qui est bien couvert, et celui de la prise en charge de la pathologie, qui est peu abordé. D'autres problèmes sont négligés (enjeux scientifiques et financiers nationaux et internationaux; transformation des pratiques de la recherche bio-médicale; élaboration des stratégies de santé publique; problèmes éthiques).

Le rôle propre du CNRS serait de stimuler les recherches sur certains aspects en mobilisant des chercheurs et des équipes autres que ceux ou celles directement concernés par le secteur médico-social. A titre d'exemple :

- La sociologie de la science et de la connaissance devrait s'interroger sur les bouleversements qui affectent les sciences bio-médicales. Comment et pour quelles raisons s'effectue une mobilisation scientifique d'une telle ampleur ? Quelles sont ses incidences dans la coopération et la concurrence entre les disciplines ? etc.

- La sociologie industrielle pourrait contribuer à éclairer les enjeux et les problèmes posés par la mise au point des moyens de diagnostics et de thérapeutique.

- La sociologie de la famille, de la jeunesse et particulièrement de l'adolescence, serait à même de se pencher sur les modifications entraînées par l'épidémie dans les comportements sexuels, les stratégies nuptiales et la constitution des modèles familiaux.

- D'autres spécialités beaucoup moins affirmées devraient être stimulées (sociologie de la toxicomanie, des homosexualités, de la prostitution ou du milieu carcéral).

## 2 - LE VIEILLISSEMENT

Dans les années à venir, le nombre de personnes âgées va continuer à augmenter dans les pays développés, posant de multiples problèmes médicaux, sociaux, financiers, éthiques. Les indus-

triels ne s'y sont pas trompés, et la plupart des molécules développées par les firmes pharmaceutiques vise cette population. Un effort de recherche dans le domaine de la pharmacocinétique et de la pharmacodynamique en liaison avec le vieillissement semble incontournable. De même, les industries cosmétiques et agro-alimentaires seront amenées à développer des collaborations avec les grands organismes de recherche, Or il n'existe pas encore de répondant scientifique suffisant en France.

En biologie, les travaux sont menés essentiellement par des unités de recherche dont une partie de l'activité est orientée vers la biologie ou les pathologies liées à l'âge. La recherche fondamentale reste trop embryonnaire et demanderait à être soutenue plus vigoureusement. Plusieurs axes semblent devoir être privilégiés, comme le contrôle de l'expression génique des protéines de fonction et de structure, la mort cellulaire programmée, les interactions entre nutrition et vieillissement, les bases génétiques du vieillissement. Il serait souhaitable que la biologie du vieillissement trouve sa place dans les différents cursus universitaires. La création récente d'un DEA de Biologie du Vieillissement est à ce titre encourageante.

Dans le domaine des sciences humaines et sociales, certaines questions ont été spécialement étudiées :

- les relations entre travail, emploi et vieillissement;
- le grand âge, la perte d'autonomie et la dépendance qui soulèvent des problèmes institutionnels, professionnels et financiers d'un système médico-social en voie de développement;
- les débats éthiques, les droits et les devoirs des personnes âgées, les questions liées à la fin de la vie (euthanasie, mort dans la dignité, expérimentation scientifique, ...).

Quelques orientations générales devraient être poursuivies et encouragées :

- passer de plus en plus de l'analyse de la vieillesse à celle du vieillissement avec des analyses longitudinales;

- resituer l'analyse de la vieillesse dans le contexte général du rapport des diverses générations et des relations entre le psychique, le social et le médical;

- développer des analyses prospectives dans la mesure où la société et le contrat social vont être remis en question par l'évolution des structures d'âges.

Contrairement à d'autres pays comme le Japon, les Etats-Unis ou les Pays-Bas, il n'existe pas en France d'agence gouvernementale ou d'institut chargé de financer et de coordonner les recherches sur le vieillissement. Des actions concertées du Ministère de la recherche, l'attribution de contrats de recherche ou de soutien à de jeunes équipes, la création de commissions spécialisées chargées d'évaluer et de promouvoir cette discipline au sein des grands organismes de recherche représenteraient une réponse minimale. La constitution de réseaux bénéficiant de soutien logistique comme la disponibilité de modèles animaux ou de banque d'organes semble indispensable.

Une politique à long terme doit être clairement définie si Ton veut que des équipes se mobilisent autour de cette thématique qui n'attire pas spontanément les chercheurs.

### 3 - TRANSPLANTATION

Les enjeux sont importants en terme d'économie de santé : l'activité transplantation va continuer à croître dans les pays développés; d'organisation stratégique nationale et européenne pour les divers organes et tissu; de biologie fondamentale : histocompatibilité, rejet, immunosuppression, transgénèse et xénogreffes; d'objet de recherche pour les sciences humaines et sociales : perceptions des techniques biomédicales de pointe par le public, retentissement psychologique et social.



La transplantation se heurte à la barrière de l'histocompatibilité. Pour la greffe de moelle osseuse, l'identité dans les groupes tissulaires doit être stricte, ce qui oblige à des greffes apparentées HLA identiques et à la mise en place d'un réseau de donneurs volontaires. Lorsque l'attente de la greffe est possible (greffe de rein), le choix d'une bonne compatibilité entre donneur et receveur est réalisable. Pour la greffe du cœur, de poumon et de foie, il est impossible de choisir le couple donneur-receveur en raison de l'urgence : on recourt à une immunosuppression forte pour lever les crises de rejet.

Le premier grand axe de recherche porte sur l'influence des différents gènes HLA dans le rejet des greffes, la présentation de l'antigène sous forme de peptide, et sa reconnaissance par le récepteur du lymphocyte T.

Le deuxième grand axe de recherche est l'obtention d'une meilleure immunosuppression. C'est surtout sur l'immunosuppression spécifique, c'est-à-dire supprimant seulement les réactions contre le greffon et non contre toute autre agression, que se portent les recherches. Le rejet reste encore difficile à juguler. Il faut tout d'abord le reconnaître et donc avoir des méthodes diagnostiques précoces.

Pour la greffe de tissus nerveux, il faut à la fois développer la recherche expérimentale et freiner l'application immédiate à l'homme.

L'avènement de la transgénèse permet d'envisager les xélogreffes comme une réelle possibilité en transplantation d'organe, en utilisant en particulier des organes de porc.

La France est au premier rang, tant dans le domaine de la recherche que dans celui de l'application clinique. L'ensemble des recherches évoquées implique aussi bien des structures hospitalo-universitaires qu'INSERM et CNRS. Ce dynamisme doit se traduire au niveau des recherches en sciences humaines et aussi sociales.

## 4 - LA MÉDECINE PRÉDICTIVE

L'objectif est de connaître et d'évaluer la prédisposition aux maladies afin d'empêcher leur survenue.

Les enjeux concernent la biologie fondamentale ; découverte des facteurs à valeur prédictive et évaluation de leurs interactions; la santé publique : stratégies de dépistage, définition des populations à risque; l'évaluation des traitements à mettre en œuvre; les conséquences psychologiques et sociales de cette nouvelle forme de médecine.

La stratégie du dépistage précoce systématique a fait ses preuves, mais elle est limitée à quelques situations. Une prévention focalisée sur les sujets à risque représente une stratégie beaucoup plus satisfaisante. Une telle stratégie comporte la recherche des gènes de prédisposition évoquée au chapitre "génétique", et la détection des anomalies biologiques traduisant le déclenchement du processus pathogène.

Les modalités du diagnostic génétique se sont considérablement simplifiées pour les maladies monogéniques dans la mesure où le gène a été cloné ou localisé. Le diagnostic prénatal de ces maladies relève de l'approche générale de la médecine prédictive, avec la particularité que la sanction thérapeutique actuelle est l'interruption de grossesse. Le diagnostic génétique peut aussi être réalisé dans la famille d'un malade atteint d'une affection génétique dans un but de traitement préventif ou de conseil génétique. Le cas des maladies polygéniques, comme le diabète insulino-dépendant, est plus complexe car la détermination précise des différents gènes n'est pas complète.

Cette médecine prédictive soulève de nombreux problèmes dont les chercheurs en sciences humaines et sociales se sont encore peu préoccupés, tant au niveau national qu'international. Outre la réflexion proprement éthique, il serait nécessaire d'étudier :

- le retentissement de diagnostics avant même l'apparition de symptômes cliniques sur les représentations de la santé, de la maladie et sur l'identité personnelle et familiale;

- les bouleversements biographiques qu'ils entraînent et les restructurations qu'ils imposent;

- les interactions entre malades, familles et équipes soignantes.

Enfin il faudrait aussi s'interroger sur les conséquences de ces développements en termes de prévention et de politique de santé.

## 5 - EVALUATION

L'évaluation apparaît comme une préoccupation transversale. Elle nécessite un investissement supplémentaire important en terme de recherche clans de nombreux domaines de la santé (stratégies de prévention, de diagnostic, de traitement, fonctionnement des structures, comportement du public) afin d'aider les décideurs dans un domaine évolutif complexe et aux conséquences politico-économiques considérables.

Des progrès dans le domaine de l'évaluation ne peuvent être espérés que par une approche multidisciplinaire réunissant médecins, psychologues, sociologues, mathématiciens appliqués et économistes. L'évaluation ne doit et ne peut être le monopole de Tune des disciplines évoquées, d'où sa grande difficulté.

Les agents qui agissent sur le marché de la santé sont confrontés à des choix soumis à diverses contraintes : biologiques, technologiques, éthiques, mais également économiques. L'organisation du marché ne garantissant pas la meilleure adaptation des actions, les agents sont amenés à justifier leurs choix, d'où le développement actuel de ce qui est, à tort, appelé l'évaluation économique et mis en parallèle, ou parfois en opposition, avec l'évaluation médicale. Il s'agit en fait d'adapter la théorie

des choix en incertitude aux problèmes rencontrés dans la santé.

La littérature anglo-saxonne consacrée à ce sujet est abondante, mais elle est de qualité médiocre et de nombreuses méthodes issues de cette recherche sont maintenant, et à juste titre, très contestées car elles ont été mises en œuvre sans qu'aucune réflexion approfondie sur leurs conditions d'application n'ait été menée et sans que leurs qualités de reproductibilité et de sensibilité n'aient été testées. Une avancée significative est nécessaire dans ce domaine, où il est à craindre que des normes internationales ne s'établissent indépendamment d'une réflexion scientifique sérieuse.

## 6 - SANTÉ ET ENVIRONNEMENT

Les craintes pour la santé représentent certainement l'une des motivations importantes de la population dans son intérêt pour l'écologie. Les conséquences des accidents nucléaires civils confortent ce sentiment. Les relations entre environnement et santé ne sauraient cependant se limiter aux conséquences des radiations ionisantes sur les organismes vivants, ni aux effets cancérigènes du rayonnement solaire sur le revêtement cutané. Les notions d'environnement et santé sont de plus en plus souvent associées, comme pour souligner l'exigence d'une approche globale de leurs interrelations.

L'écologie microbienne et l'écotoxicologie peuvent être considérées comme des exemples de recherche scientifique dans le domaine de l'environnement susceptibles de retombées dans le domaine de la santé.

- *L'écologie microbienne* a fortement progressé, ces dernières années, avec la mise au point de méthodologies permettant la caractérisation et le dénombrement des microorganismes dans le milieu, les mesures *in situ* d'activités microbiennes, Il devient possible de mener à bien des études de biologie et de génétique des populations qui sont à

la base de la compréhension du fonctionnement des systèmes microbiens, de leur épidémiologie, des interactions avec leurs hôtes, en relation avec les facteurs du milieu. Ces avancées technologiques ont des conséquences pratiques importantes. En effet, elles permettent<sup>1</sup> de mieux comprendre les sources de contamination par des germes pathogènes et ainsi de mettre au point des stratégies visant à en diminuer les risques.

La meilleure connaissance des milieux microbiens ouvre également la possibilité d'améliorer leurs qualités biologiques (par introduction de souches performantes, sélectionnées ou transformées par manipulation génétique). Les recherches à promouvoir dans ces domaines concernent l'épuration, la fertilisation, la lutte contre les vecteurs de parasites, la diminution de l'utilisation de produits polluants dérivés de l'agriculture, etc.

- *L'écotoxicologie* consiste à étudier les substances polluantes qui présentent un risque pour l'homme en raison de l'importance et de la diversité de leurs rejets, de leur persistance dans les biotopes, des capacités de bioaccumulation et dans certains cas de bioamplification, et de leur toxicité. Il est donc important de soutenir et développer les recherches en écotoxicologie afin d'étudier le devenir des polluants dans l'environnement et, conjointement, leur bioaccumulation et leurs effets toxiques sur les systèmes biologiques. Ces recherches se heurtent à l'extrême complexité des phénomènes, résultant des actions et des interactions entre les caractéristiques physico-chimiques des biotopes, les facteurs biotiques et les modalités de contamination. Elles nécessitent l'élaboration d'approches pluridisciplinaires, notamment à l'interface chimie/biologie. Les progrès actuels dans le domaine analytique permettent de déterminer avec précision les niveaux de contamination et d'apporter des informations sur la biodisponibilité des produits toxiques.

Le vivier en France dans ce domaine est insuffisant.

## 7 - BIOÉTHIQUE

L'afflux des nouvelles technologies, l'émergence du sida, la disparition progressive - sous l'effet de la curiosité des profanes et de l'intérêt des médias - des domaines réservés (sciences, médecine) expliquent l'importance croissante de la bioéthique. Malgré la noblesse du concept, les conflits de pouvoir ne sont pas absents entre juristes, scientifiques, philosophes, parlementaires. De plus, si l'émergence de la bioéthique comme objet prioritaire de réflexion est certainement excellente, il faut éviter que cela ne débouche sur de nouvelles morales ou de nouveaux carcans. Ce risque concerne en particulier l'enseignement dans le domaine.

Tout, le champ de la bioéthique doit donc lui-même être l'objet de réflexion et de recherche. Ces recherches doivent être multidisciplinaires et il est essentiel qu'aucune discipline ne soit dominante. Elles doivent impliquer les acteurs (médecins, scientifiques...) tout en gardant vis-à-vis de ceux-ci l'objectivité et la distance nécessaire.

Les objets de la recherche en bioéthique devraient être les suivants.

- *Les situations* créées par les progrès scientifiques : il faut en avoir une bonne connaissance à tous les niveaux (scientifique, historique, social, juridique, philosophique, religieux...). Il est donc nécessaire de faciliter la circulation de l'information. Plutôt que les recherches ponctuelles, il est préférable, lorsque les connaissances existent, de partir de synthèses réalisées par des équipes confirmées pour définir en fonction des connaissances qui manquent les cibles à étudier. Parmi les situations à examiner en priorité il faut retenir les conséquences éthiques du fonctionnement collectif du système de santé et des choix économiques qui peuvent être faits, par exemple, dans le domaine du vieillissement ou de l'accès aux nouvelles technologies, et les conséquences de la mise en place des techniques de médecine prédictive,



- *Le passage de l'éthique au droit*, et en particulier aux mesures législatives qui caractérisent l'époque, doit être lui-même l'objet de recherche. Cela concerne particulièrement l'impact de ces législations sur le public. Ainsi les conséquences de la loi du 20 décembre 1988 et de ses décrets d'application sur les malades et leurs familles devraient être connues et prises en compte dans la discussion de nouveaux textes.

- *Les institutions et leur évolution* doivent être l'objet de réflexions à partir de l'expérience du Comité Consultatif d'Ethique, des Comités d'Ethique locaux et des nouveaux Comités de Protection de la personne.

## RECOMMANDATIONS

### 1 - LES THÈMES

- Le *sida* doit rester un domaine prioritaire.
- Il est nécessaire que le *vieillissement* reçoive une réponse scientifique à la mesure de son importance sociale et que des équipes de biologistes cellulaires et moléculaires de haut niveau prennent cette direction.

- L'analyse des différents domaines a permis d'identifier des *zones d'ombre*. C'est le cas de la gamétogénèse, de la radiobiologie, de la biologie des métastases, de la structure des récepteurs hormonaux, de l'étude des cytokines. La France est en retard en ce qui concerne la recherche de facteurs psycho-sociaux de risque de morbidité organique. L'épidémiologie apparaît insuffisamment développée alors qu'elle prend une importance croissante pour l'identification de facteurs de risque aussi bien d'environnement biologique, physico-chimique, social que psychologique, génétique, etc. Dans le domaine de la thérapeutique la mise au point de nou-

velles protéines recombinantes, l'utilisation optimale des cultures cellulaires pour leur production sont insuffisamment développées, eu égard à leur intérêt tant théorique que pratique. Dans le domaine des sciences humaines et sociales, c'est tout le champ des nouvelles relations entre la société et la santé qui est à développer. En effet la place que la santé et la recherche en santé occupent dans la société modifie les relations entre les chercheurs dans ce domaine, les soignants et la société, il est donc nécessaire que les chercheurs en sciences humaines et sociales accordent une place croissante au domaine général de la santé sous ses différents aspects.

- Le *médicament* apparaît comme un thème essentiel dans tous les domaines. Plusieurs disciplines (cancérologie, neurobiologie, parasitologie, virologie) considèrent que les recherches sur le médicament sont insuffisantes. Les spécialistes du médicament ajoutent à cette liste les antibactériens et les analgésiques non addictifs, il faut améliorer la spécificité du médicament, ce qui implique une meilleure connaissance des récepteurs ainsi que du mécanisme d'action des médiateurs. Il faut améliorer la vectorisation. Les aspects économiques, sociaux, psychologiques des thérapeutiques (et pas seulement des biotechnologies) nécessitent des recherches plus nombreuses.

- La *thérapie génique* et la *modulation de l'expression génique* doivent devenir des axes prioritaires.

- La recherche sur les *états d'addiction* nécessite une collaboration entre cliniciens, fondamentalistes et spécialistes des sciences humaines et sociales. Elle doit être activement soutenue, compte tenu de l'extension des dépendances aux drogues et toxiques divers.

- L'attrait de la *biologie moléculaire* et l'attractivité des modèles simples ne doivent pas conduire à l'abandon de la biochimie, de la biologie cellulaire et de l'étude des systèmes intégrés. Il faut pouvoir passer du gène à la protéine, de la génétique moléculaire à la biochimie fonctionnelle des pro-

téines. Il ne faut pas oublier qu'un gène fonctionne dans une cellule et que cette cellule évolue dans un organisme complexe.

## 2 - INCITATIONS. STRUCTURE ET ORGANISATION

Au niveau institutionnel, *le renforcement d'une coordination souple entre le CNRS, l'INSERM et l'INRA* est essentielle. En effet la souplesse de la recherche biomédicale au niveau de ses structures est capitale pour permettre l'émergence des interfaces qui formeront la base d'une compétitivité européenne dans ce domaine. Mais il faut aussi que le financement des équipes CNRS qui travaillent dans le domaine des sciences de la vie soit ramené à un niveau voisin de celui des équipes de l'INSERM, sous peine de voir le champ de la biologie couvert par le CNRS se restreindre irréversiblement. Dans plusieurs disciplines de la biologie, le CNRS n'est plus représenté que par des structures mixtes avec l'INSERM, et cette mixité doit être encouragée ainsi que les échanges de chercheurs. Ces échanges de chercheurs et les filières de formations communes doivent aussi s'effectuer avec le secteur privé et avec le reste de l'Europe. Dans le domaine de l'imagerie et de la biophysique, il apparaît même nécessaire de structurer les efforts pluridisciplinaires par des actions volontaristes en créant des laboratoires mixtes ou des groupements inter-organismes (CNRS, INSERM, CEA, MEN).

*Lacoopération entre les départements du CNRS* est souvent jugée insuffisante alors que la recherche est de plus en plus multidisciplinaire et que le CNRS est un carrefour privilégié de cette multidisciplinarité. L'organisation d'un colloque regroupant les chercheurs impliqués dans les domaines de la santé et de la thérapeutique serait une mesure structurelle très utile pour favoriser les contacts interdisciplinaires et, en même temps, pour mieux faire connaître à l'extérieur l'intérêt des recherches menées au sein de l'organisme. Les interfaces biologie/chimie/informatique/physique sont à développer dans de nombreux domaines. Plusieurs

objets de recherche nécessitent une coopération entre les SHS et les sciences biologiques et médicales. Dans quelques cas exemplaires, on est arrivé à développer, au niveau institutionnel, une liaison, organique entre disciplines. D'autres recherches justifient de meilleures interfaces au sein même d'un département. C'est principalement le cas des SHS pour lesquelles il faut élargir et systématiser la mise en œuvre de programmes interdisciplinaires et l'établissement de réseaux entre laboratoires.

Il faut encourager *les recherches sur sites*, meilleur garant des synergies utiles interdisciplinaires, plutôt que de disperser les moyens. C'est le cas pour les investissements technologiques lourds comme les animaux transgéniques et la recombinaison homologe. Il n'est pas souhaitable que chaque laboratoire consacre un chercheur ou deux à ce type de travail.

Le poids croissant du *financement* de la recherche biomédicale par les fondations et les associations privées, parfois très médiatisées, risque d'orienter les recherches dans des directions qui ne sont pas nécessairement les plus justifiées, que ce soit en terme de santé publique ou d'intérêt scientifique. Le rôle de ces financements dans l'accélération des progrès de la recherche est indéniable. Il appartient donc aux scientifiques, membres des instances d'évaluation de ces organisations, de faire en sorte que toute bonne recherche bénéficie de cet appoint.

Eviter l'isolement scientifique en maintenant des *recherches fondamentales au contact du monde médical* est une recommandation forte et transversale. Ceci pourrait concourir à réduire le hiatus déjà important entre les avancées en recherche fondamentale et les innovations thérapeutiques. Les interfaces entre le CNRS et les sociétés médicales spécialisées sont indispensables pour créer des contacts étroits avec les équipes cliniques.

Dans le domaine du *médicament*, il faudrait renforcer la chimie organique de synthèse ainsi que l'interface chimie-biologie en formant les jeunes dans cette double compétence, et augmenter le

soutien de base public, un excès de contrats privés conduisant dans ce domaine à des recherches trop finalisées.

Les *biothérapeutiques* et les *bioprocédés* doivent faire l'objet d'une concertation CNRS/INSERM/industriels, compte tenu des perspectives du développement rapide des recherches fondamentales vers des applications dans le traitement de maladies fréquentes et très diverses.

Dans le domaine de la *bioéthique*, il paraît souhaitable de créer un lieu qui servirait à organiser des colloques et surtout à échanger les connaissances par l'intermédiaire de l'interconnexion de toutes les banques de données dans le domaine.

### 3 - INSTRUMENTATION.

#### OUTILS ET MOYENS INFORMATIQUES

*La recherche technologique* doit être impérativement soutenue et développée. Les progrès technologiques source de sauts qualitatifs ont souvent été le fait de structures industrielles proches de la recherche universitaire. L'interface compétitive et complémentaire recherche publique-recherche industrielle paraît, donc bien jouer un rôle positif.

*L'insuffisance des modèles animaux* (lignées génétiquement sélectionnées, animaux transgéniques) est soulignée de façon quasi générale. Un effort important dans ce domaine est donc essentiel, en particulier pour le développement de thérapeutiques nouvelles.

Le développement *d'outils informatiques* plus performants est indispensable pour accélérer le développement *des* projets sur le génome, améliorer les performances des appareils d'imagerie, modéliser les interactions moléculaires etc.

*La culture cellulaire* doit être l'objet de recherches fondamentales dans une optique d'applications multiples (production de protéines recombinantes, production de tissus *in vitro*, organes semi-artificiels).

### 4 - LA FORMATION ET LES HOMMES

Une préoccupation générale émerge fortement : la nécessité d'une formation scientifique large. La crainte est diffuse qu'une formation trop spécialisée ne conduise à une recherche complètement parcellaire nécessitant ultérieurement le développement de méthodes et de structures *ad hoc* pour permettre aux chercheurs une vision plus globale de leur domaine. Ainsi dans le domaine de la biologie fondamentale, il faut que les jeunes chercheurs ne maîtrisent pas seulement la biologie moléculaire, mais connaissent l'importance de la biochimie et de la physico-chimie classique.

Il faut encourager et non décourager la formation des médecins à la recherche et par la recherche dans le cadre des DEA, voire de thèses, afin de permettre la poursuite d'un dialogue entre chercheurs et médecins.

Dans toutes les directions de recherches que l'on souhaite développer, il est nécessaire d'augmenter la participation des unités de recherche à des formations doctorales et de créer des bourses de recherche.

**Bruno Varet**

*Président du groupe 19*

*avec la collaboration de*

*J. d'Angelo, J.P. Allard, A.M. Boudet,  
A. Combon-Thomsen, C. Herzlich,  
D. Jodelet, B. Paillard*



# 20

## CONSTRUCTION DU LIEN SOCIAL ÉQUILIBRES ET DÉSÉQUILIBRES DES SOCIÉTÉS

### DES NOTIONS EN QUESTION

#### 1 - LIEN SOCIAL ET LIENS SOCIAUX

Il y a quinze ou vingt ans, on aurait parlé de "luttres" et de "contradictions". Aujourd'hui, c'est la rhétorique, d'apparence plus douillette, du "lien social" qui s'affirme et avec elle la célébration des valeurs consensuelles, la nostalgie d'un "monde que nous avons perdu" et la reproduction de tous les fantasmes sociaux récurrents d'un univers social qui se défait, dont les valeurs et les institutions fondamentales se meurent et dont les acteurs anonymes n'ont d'autres motivations qu'un individualisme rebelle à tout projet collectif. Mais le risque est ainsi d'oublier qu'"être lié" à d'autres hommes, ce n'est pas nécessairement "positif, bénéfique ou agréable. Les liens sociaux (le pluriel présente à cet égard quelques avantages, c'est-à-dire, pour donner ici un sens opératoire minimal à cette notion, ce qui tient ensemble individus, groupes sociaux et organisations) sont souvent faits de contrainte, de

coercition ou de domination, autant que de consentement, de collaboration volontaire ou même d'intérêts partagés. Du point de vue de la connaissance de nos sociétés, comme de celles qui les ont précédées, ce qui tient ensemble sectes, organisations criminelles, seigneurs et vassaux ou serfs, clientèles ou hiérarchies de castes, n'est certainement pas moins pertinent et moins intéressant que ce qui tient ensemble entreprises, anciens de grandes écoles, bureaucraties, nations... ou couples.

Vaut-il mieux parler de lien social ou bien de liens sociaux, au pluriel ? A partir de la notion de lien social, les scientifiques ont d'abord cherché à saisir quelles étaient les bases premières des relations en société, et à viser une synthèse généralisante. D'où l'emploi conceptuel du singulier. Des dimensions anthropologiques fondamentales ont été recherchées du côté à la fois de la langue et de la communication, des formes d'échanges des biens et des systèmes de parenté centrés sur la reproduction et les alliances. Puis, peu à peu, l'usage de la notion s'est élargi, à mesure de la diversification des disciplines scientifiques, ainsi que de l'élargissement de cette perspective aux Etats modernes et aux sociétés industrielles. Pour autant, peut-on réunir sous ce terme de "lien social" l'ensemble des

types de relations individuelles et collectives en sociétés, y compris toutes les formes contemporaines d'ingénierie sociale ?

De divers sens que suggère le terme "construction", on se gardera de retenir autre chose que le rappel, décisif, que ce sont bien les acteurs sociaux - mais souvent sur un mode non-intentionnel - qui reproduisent, et défont les liens sociaux et qui les recomposent aussi en détruisant simultanément d'autres. On se gardera notamment d'y discerner quelque évolution linéaire ou même une avancée continue vers une complexité croissante du monde social. S'il est bien entendu impossible aujourd'hui de penser les liens sociaux en dehors de l'appréhension de ce qui se joue dans la différenciation de nos sociétés en de multiples sphères sociales, champs ou secteurs fortement institutionnalisés, plus ou moins "autoréférentiels" et plus ou moins autonomes les uns vis-à-vis des autres, l'analyse de cette différenciation dans sa profondeur historique - tâche qui est encore loin d'être achevée - nous révèle à la fois sa contingence et sa vulnérabilité, celle-ci se déchiffrant autant dans les effacements de durée longue que dans les spectaculaires "reculs" dont notre siècle ne s'est pas montré avare.

## 2 - EQUILIBRES ET DÉSÉQUILIBRES

Loin de s'opposer, comme le voudrait le sens commun, "équilibres" et "déséquilibres" coexistent fréquemment au sein des mêmes sociétés; en outre - et Ton devrait considérer ce point comme l'un des acquis des sciences sociales - "déséquilibres", "instabilités" ou "désordres" ne sont pas par essence antinomiques du "lien social", Ils peuvent en être les produits ou les effets; ils peuvent encore, c'est le plus souvent le cas, s'y alimenter, prendre appui sur lui, ou, si Ton préfère, le mobiliser.

Prenons un exemple. Classiquement, l'économie se démarque d'autres sciences sociales par la figure de Tordre qu'elle propose. L'intégration des comportements n'est pas assurée par des normes ou des valeurs qui assureraient la cohésion d'un

groupe social ou qui entraîneraient des conflits entre groupes, mais figurée comme un équilibre d'échanges entre des individus indépendants. Les deux modèles, concurrents, sont l'objet de critiques réciproques : le rôle des attaches sociales sera volontiers jugé irréaliste ou exorbitant par les économistes, alors que la notion d'équilibre comportera, pour des chercheurs intéressés par les pratiques sociales, un biais fâcheux en raison de l'atomisme des comportements et des mécanismes homéostatiques que ce modèle suppose.

Cependant, les deux modèles précédents sont remis en cause dans les disciplines où ils ont vu le jour, sinon dans les discours politiques qui continuent à les mettre en oeuvre. Et ces remises en cause peuvent suggérer de nouveaux éclairages sur la nature des liens entre les membres d'une société, en même temps qu'ils ouvrent de nouveaux espaces de dialogue entre disciplines. Ainsi les économistes découvrent l'importance, dans le fonctionnement des organisations, d'une forme de lien durable supportant la confiance, qui n'est plus réduite à la survivance archaïque de liens traditionnels auxquels les historiens ou les anthropologues auraient un accès exclusif. Inversement, la prise en compte de types de liens universalisants (par le marché et l'équivalence monétaire, par des standards techniques ou par des systèmes de communication d'images médiatiques unifiées) conduit les sociologues à considérer des formes d'interdépendance qui ne correspondent pas à des liens personnalisés et ancrés dans des lieux et des traditions.

"Equilibres", "déséquilibres" : les qualificatifs ainsi donnés parfois hâtivement à des situations qui s'avéreront par ailleurs identiques, c'est-à-dire la succession dans le temps de diagnostics contrastés et les réévaluations contradictoires d'une même conjoncture, doivent nous alerter sur la fragilité des jugements instantanés et nous montrent toute l'importance du recul que peut ici donner l'approche historique. Cette dimension d'analyse fait en effet place aux processus de longue durée, relativise les effets de "nouveau" ou de "rupture". Elle paraît également essentielle pour situer les articulations entre les temporalités différentielles des phéno-

mènes. Mais à côté de cette dimension du temps, celle de l'espace s'avère par ailleurs importante pour construire les approches du lien social. Elle stimule les comparaisons et aide à relativiser aussi les diagnostics, mais surtout elle permet d'approfondir les contiguités, les relations, les diversités. D'autant que les réflexions sur la spatialisation des relations sociales ouvrent à un réexamen critique des assimilations trop rapides faites entre le lien et la proximité ou la mobilité.

Nous nous proposons, dans le cadre limité de ce rapport, deux objectifs complémentaires : dresser un rapide panorama des différents types de disciplines ou de problématiques qui contribuent à éclairer ou à réévaluer les interrogations actuelles formulées à propos du "lien social", et, autant que possible, cerner les orientations de recherches qui permettent d'actualiser les conceptions classiques du lien social, en montrant les dynamiques sur le plan méthodologique

## CHAMPS ET PROBLÉMATIQUES

### 1 - RUPTURES OU CONTINUITÉ

Le constat généralisé en France de la perte d'emprise des formes traditionnelles d'identification (nation, églises, syndicats) et des systèmes de représentation totalisants, religieux ou séculiers (ex : le déclin du mythe de l'Etat, du modèle du militant, de la figure de l'ouvrier ou encore de l'idéologie de la famille), à laquelle s'ajoute l'affaiblissement des solidarités antérieures (villageoises,...) et des normes collectives (civisme, patriotisme, laïcité, ...), incite le sens commun à s'engouffrer dans l'hypothèse d'un "éclatement du lien social"; la famille elle-même paraît ne pas y échapper,... Ces dérégulations institutionnelles sont pour une large part at-

tribuées à la montée de l'individualisme, lequel se traduit, entre autres, par de nouvelles formes de re-composition des identités individuelles et collectives. Ne s'inscrivant plus dans la continuité des grandes institutions (étatiques, religieuses ou autres), autrefois productrices et régulatrices des normes et des valeurs, les acteurs sociaux d'aujourd'hui tendent davantage à "construire", voire à "bricoler", leurs identités individuelles et collectives à travers des parcours délibérément personnels et subjectifs et une revendication plus ou moins explicite d'autonomie. Ces évolutions sont le plus souvent interprétées comme étant le fait d'une dérégulation des modes de transmission fondés sur le principe de l'autorité de la tradition (religieuse, juridique, politique ou culturelle), considérée dans le passé, à tort ou à raison, comme le producteur et le régulateur privilégié (sinon exclusif) des normes, des valeurs et des règles de conduites individuelles et collectives. Ces grandes traditions fondatrices de la légitimité de l'ordre social par lesquelles se définissaient les règles du "vivre ensemble" tendent à n'être plus que de simples réservoirs de symboles, des référents identitaires à caractère non contraignant (à l'exception du pénal, *ultima ratio*). Leur statut d'agent institutionnel du lien social n'est plus reconnu comme tel.

Toutefois, l'invocation d'une adéquation du lien social aux institutions traditionnelles, tenue pour caractéristique des siècles antérieurs, procède largement d'une idéalisation mystificatrice du passé et se heurte au démenti que lui donnent aujourd'hui les historiens, en particulier ceux du Moyen Age et de l'Ancien Régime. Les acteurs sociaux n'ont jamais cessé de composer, de s'approprier les normes, évitant le plus souvent de les rejeter brutalement, mais ne se soumettant à elles qu'en les infléchissant de quelque manière; dans le passé comme aujourd'hui, les liens sociaux s'établissent et ne sont possibles que dans la recherche de compromis toujours à renégocier : le fils avec le chef du patrilignage, le vassal avec son seigneur, le sujet avec les représentants du roi. Ainsi l'histoire de la criminalité révèle-t-elle (loin de l'image lénifiante d'une société jouissant du bonheur d'un "lien social"<sup>11</sup> généralisé, seulement menacé sur la péri-



phérie par les bandits de grand chemin), l'ampleur de la violence au quotidien, celle des gens ordinaires, quand la défense de l'honneur privé remporte de fait sur **l'idéal** de la paix civile et la crainte de la justice du roi; et ce dernier, inversement, use moins souvent de son pouvoir de punir que de son droit de grâce, dont dépend sans doute son image de souverain miséricordieux, mais qui montre aussi les limites de la contrainte face aux solidarités locales ou familiales.

La substitution de modèles historiques plus complexes et dynamiques à l'illusion rétrospective d'un unanimité passéiste attire l'attention, dans la société contemporaine aussi, sur la multipolarité des référents sociaux. La recomposition permanente, et à tous les niveaux, du lien social amène les chercheurs à s'intéresser à des formes de sociabilité et de convivialité intermédiaires, à côté des structures institutionnelles stables (telles que l'Etat, l'Eglise, l'école républicaine, l'entreprise manufacturière) et du noyau familial ou encore des seules logiques individuelles.

Sur ce point l'apport de l'histoire, notamment son souci de la "durée", est, une fois encore, précieux; la prise en compte de la profondeur historique et des rythmes différenciés des processus de formation, de désintégration, de transformation des "liens sociaux", aide à une meilleure intelligence des dynamiques contemporaines. Cette approche jette un supplément d'éclairage et permet de relativiser ce qu'on nomme communément "crises" ou "déséquilibres"; tel est le cas en particulier des crises économiques, objet depuis longtemps de l'intérêt des historiens : si Ton a beaucoup insisté, et à juste titre, sur l'importance des mutations entraînées par la crise des années 1970-1980, la mise en perspective historique permet d'en relativiser l'impact, en regard par exemple de la crise des années 1930 ou de "la grande dépression" mondiale des années 1873-1896, à certains égards si proche de celle dont nous sortons depuis peu; dédramatisés par la mise en perspective spatio-temporelle, ces "crises" ou "déséquilibres" apparaissent alors comme autant de phases de rééquilibrages des structures sociales d'ensemble.

## 2 - LES RESTRUCTURATIONS PERMANENTES DES LIENS SOCIAUX

De nombreux travaux mettent l'accent sur les transformations des liens de sociabilité en même temps que sur la permanence des fonctions de certaines institutions. C'est à travers l'observation et l'étude des formes concrètes, présentes et passées, de la famille et des modes de construction des parentés réelles et symboliques, de la vie associative, des formes jugées marginales ou déviantes du lien social (bandes, sectes, groupements affinitaires à caractère religieux ou ethnique, exclus ou "élites sectorielles"), des nouvelles formes de ritualité et de participation hors des groupes dominants, et des réactions sociales qu'elles suscitent, que s'oriente une part des recherches. A titre d'exemple, les travaux en sociologie des religions qui, une fois le constat posé du déclin généralisé du poids social de la religion et des institutions religieuses, étudient les émergences de nouvelles formes de religiosité, lesquelles induisent une pluralisation de l'offre religieuse, créant, de fait, une situation de "marché des biens de salut" (la notion de marché étant entendue ici dans le sens stratégique du terme plutôt que dans sa dimension marchande, encore que celle-ci n'en soit pas totalement absente), marché dont la "clientèle" est d'une extrême fluidité et où les institutions religieuses centrales oscillent entre la surenchère et la négociation avec leurs marges.

Dans le genre longtemps dominé par la sociologie de la déviance et de la réaction sociale ou encore par l'approche multidisciplinaire des modes de socialisation, des travaux plus récents mettent l'accent sur les conditions sociales de l'insertion (ou de la réinsertion) des personnes, sinon totalement exclues, du moins en situation de désaffiliation relative. Ces travaux privilégient le plus souvent les facteurs culturels, familiaux, communautaires, ou encore les pratiques d'accompagnement social. L'exemple déjà ancien des handicapés et des mouvements de parents d'enfants inadaptés, celui des nouveaux modes de vie intergénérationnels face au chômage des jeunes ou à la "mort sociale" du troisième âge, celui de la sortie de la toxicomanie abor-

dées à partir du suivi d'une cohorte de jeunes, celui des bénéficiaires du RMI et de leur "citoyenneté restaurée"<sup>11</sup> ou encore celui de l'accompagnement communautaire des malades atteints par le VIH, montrent autant de voies de renouvellement de l'activité scientifique au croisement de plusieurs disciplines (sociologie, ethnologie, psychologie sociale, psychanalyse).

D'autres travaux encore s'intéressent aux secteurs et institutions qui fabriquent du lien social et aux transformations de ces pratiques finalisées dans le contexte de crise de l'Etat-providence et de recherche d'alternatives : travail social, secteur associatif, technologies institutionnelles (assistance, assurance...), politiques socio-judiciaires et sociales en direction des populations déstabilisées ou des catégories à risque, mobilisation, nationale au nom de la solidarité, de l'action humanitaire ou du droit d'ingérence,

A cet égard, la place du droit et de la régulation juridique du lien social mérite l'attention. Constatant de nombreux signes d'un retour au droit, tant dans les régulations les plus instituées (jusqu'à l'activité des juges pour enfants ou à celle des juges des affaires matrimoniales, sans oublier les comités d'éthique et autres conseils de sages) que dans les nombreux plis de la vie quotidienne soumis à des transformations accélérées (modes de procréation, explosion des modes de vie familiale, droit des enfants, statut du hors-travail, migrations et conflits de cultures, contentieux de la protection sociale ou de l'assurance, logement, consommation et usages, développement de la médiation/conciliation...), la question de la régulation juridique du lien social est devenue un domaine d'investissement fécond tant pour les juristes que pour les sociologues et anthropologues du droit.

Dans le même ordre d'idées, des chercheurs s'interrogent sur la manière d'appréhender les systèmes de décisions dans les politiques publiques que la décentralisation a rendu véritablement "polycentriques" (Europe, Etat, départements, régions, ville), dispositifs de travail en réseaux qui échappent de plus en plus au modèle d'interprétation op-

posant un centre et une périphérie. D'autres, considérant certaines transformations dans le nouvel espace public - développement du marché de l'expertise locale, partenariat, évaluation technocratique et/ou démocratique, participation nouvelle des usagers - s'interrogent sur la place et les implications d'une "éthique de la discussion".

L'ensemble de ces travaux, et d'autres non évoqués ici, permettent d'affirmer que le lien social n'est pas donné, mais est à construire et à reconstruire constamment du fait de son extrême fluidité, du pluralisme culturel, et enfin du renouvellement des générations.

### 3 - LE TRAVAIL JOUE-T-IL ENCORE SON RÔLE D'INTÉGRATION SOCIALE ?

La dimension économique de la crise du lien social révèle de son côté que l'économie n'est plus apte à fournir la matière à une action gouvernementale efficace, ni à fournir les conditions de la solidité, de la reproduction et de l'entretien du tissu social. Même s'il crée d'autres formes de lien, le "marché élargi" (qui diffère qualitativement et quantitativement du "marché local") est destructeur du lien social; les flux monétaires n'assurent pas par eux-mêmes du lien social, la circulation de l'argent étant de plus en plus abstraite.

Quant au monde du travail, les transformations des modes de socialisation professionnelle révèlent que le travail ne remplit plus sa fonction, d'agent d'intégration sociale (chômage, déclassement, mobilité). Cette incapacité croissante transparaît nettement au sein de l'entreprise. Significative est la prise de conscience de plus en plus nette de la notion de "culture d'entreprise". Les dirigeants des firmes européennes ont, à l'instar de leurs concurrents américains et japonais, pris conscience de l'importance de la fonction d'intégration jouée par l'entreprise; ils ont aussi pris conscience que plus fort est le sentiment d'identification à l'entreprise, plus il est possible d'en mobiliser les salariés en vue des objectifs ultimes de cette entreprise :

d'où l'importance accordée aujourd'hui à l'image de marque, au logo, au badge, au pin's. L'entreprise échappe ainsi de plus en plus à la seule fonction productive pour devenir un lieu de sociabilité où l'on partage et entretient des valeurs communes. On comprend dès lors le regain d'intérêt pour les histoires d'entreprises et le développement, d'une "*business history*" qui n'échappe pas toujours, loin s'en faut, aux risques de reconstituer un passé idéalisé (d'autres diront aseptisé), plutôt qu'une réalité complexe, voire contradictoire, faite aussi bien d'échecs que de réussites. De façon plus large, ce regain d'intérêt pour l'entreprise ressort d'un retour aux préoccupations microéconomiques, la crise des années 70 ayant mis en défaut les grands et ambitieux modèles macroéconomiques mis au point en vue de planifier le développement économique futur ou de prévoir les fluctuations économiques à court terme. On en revient ainsi à une approche plus modeste et plus soucieuse de tenir compte de la multiplicité des comportements d'agents économiques.

#### 4 - DES CHAMPS PRIVILÉGIÉS D'OBSERVATION

L'explosion des techniques de la communication (télévision, téléphone, minitel) a entraîné un changement d'échelle des rapports sociaux qui amène à s'interroger sur la nature du lien social ainsi engendré du fait de la masse et de la concentration des moyens, mais aussi du fait du caractère inédit des nouveaux liens ainsi établis, à distance, déconnectés du voisinage et de la présence effective. L'une des lignes de recomposition de l'intervention sur le lien social passe désormais par les nouvelles technologies communicationnelles. Des innovations importantes comme la multiplication des "SOS" et des "téléphones verts" associatifs ou ministériels, visant aussi bien la prévention que le signalement (suicide, sida, toxicomanie, maltraitance...), de même que les nouvelles émissions proposées à la télévision concernant le financement privé des organisations caritatives ou de recherche (Téléthon) ou les "*reality shows*" *l'amour* en dan-

ger", "*Mea culpa*", "*Avis de recherche*"...) transforment considérablement le statut social de la souffrance, mais aussi celui des réponses possibles à cette souffrance. Le lien social manifeste ainsi son caractère à la fois fluide et vulnérable. Toutes ces conduites et pratiques sociales émergentes à l'interface du lien social, des médias et de la "société machinique" (ou branchée) devraient être mieux prises en compte par la recherche publique.

En marge des études menées dans des champs traditionnellement identifiés comme porteurs de crises, conflits et tensions (le monde du travail, le politique, etc.), les travaux effectués en socio-linguistique ont mis en évidence la dimension créatrice du conflit dans le domaine du langage. Le conflit langagier y est perçu en tant que producteur d'identités, la créativité verbale naissant de la mise en cause des équilibres constitués. Ainsi, les pratiques langagières sont-elles les lieux des contradictions et des tensions que toute société produit. Les conflits communicationnels peuvent être soit déduits à partir d'une analyse du fonctionnement des systèmes sociaux, soit, au contraire, induits à partir des conséquences des interactions entre acteurs. Pour les sciences du langage, le lien social par excellence, c'est le langage dans toutes ses manifestations quotidiennes. Les lieux communicationnels privilégiés de cette construction du lien social sont d'abord ceux de la socialisation langagière de l'enfant (famille, école, rue, vie associative, ...), puis ceux des interactions de la vie quotidienne, ceux des relations de travail dans les entreprises, etc. Corollairement, les secteurs du champ social considérés comme zones à risques sont ceux où le lien social se distend, en l'occurrence là où le contrat communicationnel n'est pas/plus possible (discours d'exclusion, perte identitaire). Il apparaît que la dynamique de la langue a partie liée avec les modèles que proposent les diverses agences de socialisation. Cette question n'est pas sans rapport avec celle de la citoyenneté (par ex : pour l'école de la 3ème République apprendre à bien parler et bien écrire la langue française sert à devenir un bon Français républicain, tandis que, selon le modèle actuel, on apprend à bien "communiquer" pour s'en sortir, vendre, obtenir ce qu'on veut, "réussir").



La ville et les modes de vie urbains deviennent un des cadres essentiels des façons de penser la société, autant dans l'élaboration du sens (pour l'analyse) que dans l'identification des problèmes (pour Faction) : les études sur la production et la division sociale de l'espace, celles des phénomènes de ségrégation spatiale (ghettos, "quartiers chauds"), les travaux sur la mobilité spatiale, peuvent utilement éclairer la réflexion sur le lien social. Par ailleurs, c'est dans les espaces urbains ou suburbains que se trouvent concentrés les grands problèmes de société : drogue, petite délinquance, criminalité, sida.

L'ampleur des phénomènes urbains ne doit pas pour autant faire perdre de vue les nombreuses interrogations sur la ruralité. Si l'essentiel de l'attention se porte effectivement sur la ville, les travaux sur le monde rural se sauraient être ni délaissés, ni passés sous silence.

La réflexion autour du lien social se porte aussi sur de plus vastes ensembles\* Les comparaisons à l'échelle européenne qui se mettent en place s'intéressent à des domaines et à des problématiques divers : jeunesse, religion, statut des minorités, ... On remarquera, à ce propos et en marge, que l'internationalisation constante des échanges, scientifiques et autres, comporte une dimension linguistique qui mérite l'attention. On constate que la pratique généralisée de l'anglais, devenue de fait la première langue internationale, induit de multiples effets : outre le recul de la pratique de la langue française, et par voie de conséquence l'affaiblissement de l'influence de la culture et des modes de pensée qu'elle véhicule sur la scène internationale, l'usage souvent imparfait de l'anglais par des locuteurs non anglophones aboutit à un appauvrissement linguistique considérable (lexical et syntaxique). Cet appauvrissement linguistique mène à un appauvrissement, plus dommageable encore, celui de l'échange lui-même, tant au niveau des contenus que de la pensée qui les sous-tend. Cette dimension linguistique du lien social au plan international ne saurait manquer de susciter la réflexion des responsables et des chercheurs.

De leur côté, les grands bouleversements et les vastes mouvements sociaux à l'échelle mondiale (crises persistantes des économies développées, renouveau politique d'idéologies nationales, ethniques ou religieuses, risques écologiques et nucléaires) fournissent un contenu substantiel à une mise en rapport de la conjoncture sociale et de la conjoncture scientifique.

Ainsi les transformations politiques brutales survenues en Europe, de même que les effervescences que connaît le monde arabo-musulman, posent de façon aiguë la question du lien politique et plus spécifiquement, pour la France, la question de son modèle républicain dans l'évolution de la démocratie. Face à la "crise" de l'Etat-Nation à l'Ouest, face à l'émergence ou à la ré-émergence des consciences nationales consécutive à l'écroulement des systèmes et des idéologies politico-économiques au Centre et à l'Est de l'Europe, face à l'insuffisance avérée de Faction des politiques gouvernementales, de nouvelles formes de légitimité se cherchent. Pour ce faire, elles puisent dans les stocks disponibles de traditions - nationales, ethniques et surtout religieuses - qu'elles réinventent en se les réappropriant. *"Lorsque le politique fléchit, le religieux revient"* disait Michel de Certeau, On observe ainsi, dans ces pays, des recharges réciproques (terme préféré à celui d'instrumentalisation) du politique et du religieux. Là comme ailleurs se trouve posée la question des fondements de la démocratie et des critères de la citoyenneté, et, de façon plus large, la question de la recomposition du lien social en contexte de changement.

## EVOLUTION DES PROBLÉMATIQUES ET DES MÉTHODOLOGIES

Depuis une vingtaine d'années, nos analyses de la société moderne ont oscillé entre des approches nettement "micro" (psychologie de la per-

ception, phénoménologie des attitudes, imaginaire de la ville, par exemple) et d'autres très "macro" (logiques socio-économiques, conflits collectifs, rationalité de l'action de l'Etat)- Mais entre l'individu et la société, l'échelle intermédiaire des groupes et des réseaux n'aide-t-elle pas à mieux comprendre les types d'interrelations qui sont à l'œuvre dans ce qui tour à tour fait et défait le lien social ?

Les démarches d'analyse ont par ailleurs recherché à prendre pour matériaux (et souvent pour manifestation essentielle de ce que serait la "réalité") tantôt des éléments discursifs ou des représentations, tantôt des conduites d'action, en développant des outils spécifiques à chaque perspective. Par quelles méthodes les tentatives actuelles de réarticulation entre les représentations et l'action (sans que l'une ou l'autre dimension soit minimisée) peuvent-elles pour leur part passer ?

Comment, enfin, sans se couper d'une approche descriptive des comportements des sujets individuels ou collectifs, élaborer une analyse de la construction des conduites qui ne mette pas seulement en avant les déterminations sociales d'ensemble ?

Telles sont quelques-unes des interrogations qui nous ont guidés dans cette réflexion sur les problématiques et les méthodologies,

## 1 - BILAN

### Approches catégorielles

Certaines problématiques s'attachent principalement à caractériser des ensembles de conduites collectives, en fonction de catégories de populations, de groupes d'âge, ou de politiques sectorielles notamment. Affinant ou remettant en question les approches en termes de classes sociales, ces types de problématiques cherchent à caractériser des groupes aux trajectoires sociales spécifiques, en relation avec les calendriers, les formes

de l'action publique, ou les situations majeures de socialisation (formation, travail, etc.)

On peut en particulier se référer à quelques courants centrés sur une problématique identifiable et ayant produit des résultats intéressants dans la sociologie française : travaux sur la sociologie de la jeunesse comme "âge de la vie", ou ceux qui concernent les jeunes défavorisés confrontés aux difficultés de l'insertion. Dans le champ des politiques sociales, outre les problématiques classiques comme celle de "l'étiquetage" (*labelling*) de catégories dites "à risque", se cherche actuellement une problématisation de la demande publique d'évaluation s'appuyant notamment sur une analyse du jugement et de l'expertise.

Ces conduites collectives ont été étudiées également par la géographie sociale, en termes d'équilibres et de déséquilibres des sociétés. Une équipe s'est particulièrement investie dans les travaux sur les liens entre contiguïtés spatiales et proximités sociales, sur les pratiques sociales, sur les stratégies d'acteurs du "social". D'autres ont mis l'accent, par l'étude des espaces ruraux, en terme de territoire et de territorialité, sur leurs aspects identitaires. Les géographes ont plus largement abordé la question par le biais du logement, en particulier en Ile-de-France, où la mobilité intervient comme l'un des premiers facteurs explicatifs. De fait, la mobilité spatiale est sans doute la caractéristique majeure de nos sociétés contemporaines, au moins dans les pays industrialisés occidentaux, et, comme telle, une des principales clés de la compréhension des transformations du lien social

Tout d'abord, l'espace intervient selon des distances et des seuils qui dessinent ensemble des aires de sociabilité. Mais la continuité qui a jusqu'à présent prévalu - au sens de la contiguïté - s'efface devant des espaces connexes et discontinus, mais reliés par des caractéristiques communes, identitaires pour un groupe social : espaces de travail, espaces de loisirs, espaces culturels. Aussi la reconstitution du lien social peut-elle s'étudier tout particulièrement soit par l'analyse des trajectoires

socio-spatiales sur des temps suffisamment longs, soit par celle des réseaux qui relient les espaces et les groupes sociaux qui y trouvent leur identité. Autrement dit, ces espaces font systèmes et dégagent des territorialités.

Approches par trajectoires, approches par réseaux se distinguent également par leur degré et leur type d'analyse. Le premier permet d'apprécier des niveaux individuels, où le social l'emporte sur le spatial. Il montre combien le lien social est maintenant déstructuré, par exemple au sein d'un groupe pourtant fort comme la famille, et même le couple. Le second, à l'inverse, privilégie l'espace et dégage plus aisément des thématiques telles que, pour prendre des exemples simples, l'espace des relations d'affaires, l'espace culturel, etc

De manière plus générale, de multiples disciplines (psychologie, médecine, démographie, histoire, ethnologie) sont aujourd'hui affrontées à des mutations du contexte national et international qui conduisent à développer des "regards croisés" sur des aspects-clés du lien social. La crise économique, les transformations familiales, la rupture dans les équilibres/déséquilibres mondiaux, l'affaiblissement des systèmes de repères traditionnels (religion, idéologie) ont réorienté les recherches dans le sens d'une analyse plus poussée :

- du comportement de groupes périphériques, marginalisés, exclus, de tous ceux qui sortent des modèles dominants du point de vue de l'emploi, de la structure familiale, de l'appartenance ethnique : familles monoparentales, bénéficiaires du "Revenu minimum d'insertion";

- des politiques publiques (entendu au sens large, y compris l'étude des groupes, associations privées qui participent à la création de ce lien social) ; tentatives d'analyse des processus d'évaluation, réflexion sur la place exacte des agents sociaux collectifs;

- des grands équilibres démographiques, économiques, écologiques (sexes, âges, régions...).

Ce qui invite à un découpage des problématiques selon un plan en "âges de la vie" :

- Socialisation "primaire", construction du "moi", psychologie de l'enfant, "*child care*". Beaucoup a été fait du côté des psychologues, des médecins, des démographes et des historiens. Beaucoup serait à faire du côté de l'étude de la transmission des modes de savoir et de faire dans le domaine de la prime éducation (d'une génération à l'autre), du côté de la réflexion sur l'organisation des réseaux de parenté (travaux en cours sur la parenté élective, la parenté spirituelle, la parenté sociale, la parenté adoptive; comparaisons intéressantes avec l'expérience de certains pays africains et avec les expériences passées),

- Ecole, apprentissage ; fonctionnement et dysfonctionnement, enseignement de masse et sélection des élites.

- Travail : insertion, exclusion, sortie d'activité, notion de carrière. Sur ces deux questions - formation-travail -, on peut insister sur le résultat flagrant des études menées concernant la "gestion des âges"; il y a discordance entre d'une part, la nécessaire fluidité des séquences de formation-travail et la nécessaire mobilité géographique, dues aux évolutions technologiques et aux réorganisations des groupes industriels et de services, et, d'autre part, la rigidité des catégories mentales encore à l'œuvre et inscrites dans de nombreux dispositifs sociaux et économiques. "L'âge de l'école", Page de la retraite" peuvent-ils changer ?

- Le dernier âge de la vie, l'extrême vieillesse. Beaucoup a été fait là aussi du côté des aspects médico-psychologiques; beaucoup resterait à faire sur le plan de l'analyse sociologique proprement dite. L'ethnologie et la sociologie de l'accompagnement des mourants sont un champ largement ouvert. Par ailleurs, des travaux sont en cours sur la déconstruction" de notions comme le "Vieillessement des populations des pays industrialisés, avec une réévaluation des rapports entre les générations (cf. la question des retraites).



## Les modèles de l'interaction

D'autres approches privilégient, pour leur part, les processus d'interaction entre différents acteurs micro-sociaux, tout en conservant dans certains cas comme perspective l'explication de changements sociaux d'ensemble, la compréhension de dynamiques collectives de socialisation (dans la famille, l'école, la vie associative, etc.), ou encore la variation de taille des acteurs que suppose la relation entre des interactions locales et un intérêt général

En réaction à une appréhension globale du lien social mettant l'accent sur l'ordre et la reproduction de la société, ou sur l'unité organique des ensembles collectifs, les différentes approches de l'interaction s'intéressent à la dynamique du lien entre les acteurs en cherchant à l'appréhender en situation. À une compréhension du collectif reposant sur des normes ou des valeurs partagées, ces démarches substituent une analyse du jeu entre des acteurs dans des contextes incertains qui ménagent la négociation. La négociation peut porter non seulement sur les actes eux-mêmes, mais aussi sur leur interprétation et sur les catégories utilisées par les acteurs pour se repérer et juger de la situation. Ces recherches contribuent ainsi à renouveler les modèles des capacités cognitives des agents, modèles nécessaires pour comprendre les façons de faire et de défaire un lien social. Les terrains d'application sont notamment les relations d'usager ou de membre d'institutions, et plus généralement les situations de tension entre un engagement personnel et des formes collectives.

L'évolution des sciences du langage, particulièrement de la sociolinguistique, témoigne également de cette transformation des problématiques en sciences sociales. Le mouvement se fait, en gros, de positions fonctionnalistes et évolutionnistes vers des positions agonistiques ou interactionnistes. À la vision d'un système linguistique qui tend à maintenir un équilibre interne parce que chaque élément possède une fonction contribuant à ce maintien, succèdent des représentations dynamiques. Elles peuvent mettre en avant des conflits et des contradictions dans les pratiques langagières et leurs normes, ré-

sultat d'antagonismes majeurs dans la société, ou bien se référer aux situations concrètes d'interaction et à leurs effets sur la constitution de collectifs.

L'approche de la dynamique des interactions ne s'oppose pas à une analyse des formes du lien social, dans la mesure où elle ne sombre pas dans un "localisme" qui supposerait des individus dépourvus des ressources collectives propres à dépasser les circonstances de la situation. Le passage du "micro" au "macro" ne peut se réduire à une figure d'agrégation dès lors que l'on porte attention à la nécessité, pour les acteurs eux-mêmes, de passer d'un niveau personnel ou local d'appréciation à des formes générales de jugement impliquant la référence à une communauté et à un bien commun plus larges.

## Interrelations entre individus et collectivités

Mais d'autres perspectives de recherche tentent d'emblée de dépasser les oppositions classiques entre échelles "micro" et "macro" dans les analyses et de saisir les rapports entre les dimensions *objectives* et *subjectives* du lien social.

La particularité du "lien social" pourrait bien être qu'il exprime de manière privilégiée une réalité présente à la conscience et dans l'expérience des sujets sociaux eux-mêmes.

Que ce soit sous la forme d'institutions au sens large (structures étatiques, argent...), de représentations et d'idéologies (conscience nationale, ethnique, religieuse, œuvres de cultures...) le lien social s'expérimente directement chez les sujets, induisant des rapports réciproques mais diversifiés entre les états sociaux - équilibres ou déséquilibres... - et leurs représentations. Les points d'appui méthodologiques sont assez variés, mais on pense en particulier à :

### *L'histoire de la "sociabilité".*

On retiendra l'importance et l'évolution des travaux historiques portant sur ce que les historiens

français sont convenus d'appeler la "sociabilité" : les formes d'association et de convivialité intermédiaires entre d'une part les structures institutionnelles stables de l'Etat ou de l'Eglise, d'autre part le noyau familial et les individus. Issue de l'étude ancienne des guildes, des corporations d'Ancien Régime, cette recherche se caractérise aujourd'hui par le dépassement de l'approche strictement juridique et institutionnelle au profit d'une pleine intégration dans l'histoire sociale et l'anthropologie historique. Elle met l'accent sur la transformation des liens de sociabilité, mais aussi sur la permanence de certaines fonctions.

### *Les relations de parenté réelle et symbolique.*

Sous l'influence de l'anthropologie sociale, l'étude historique de formes de parenté réelle et symbolique est devenue très importante. Elle renouvelle et élargit l'interrogation antérieure (dans le sillage de Ph, Ariès) sur l'histoire de la famille. Elle s'interroge sur l'apparition de nouvelles formes de parenté (par exemple la naissance du lignage aristocratique à l'époque féodale), et sur leurs transformations clans le temps (par exemple sur les conséquences théoriques et pratiques de l'élévation de l'interdit de l'alliance du 4ème au 7ème degré de consanguinité, à partir de 1214). Parallèlement, on découvre aujourd'hui les rôles et les formes multiples de la parenté dite artificielle ou symbolique : les liens institués autour du baptême par le parrainage et le compérage, ciment d'un clientélisme puissant, par exemple dans la Florence du Quattrocento. C'est aussi en termes de parenté symbolique que sont analysées les relations féodo-vassaliques, les *fraternités* nouées entre communautés monastiques et familles aristocratiques, les confréries urbaines ou rurales : soit le tableau beaucoup plus riche d'une société pensée en termes de réseaux, d'un entrecroisement de solidarités matérielles et spirituelles avec lesquelles l'Etat naissant à la fin du Moyen Age dut doublement compter : soit pour s'appuyer sur elles, soit pour tenter de les détruire.

### *L'individu et le groupe.*

C'est dans ce contexte que la question de l'individu revient au premier plan. Ayant abandonné

les assertions simplistes d'un Jakob Burckhardt (l'individu, "découvert" par la Renaissance italienne), les historiens n'en sont pas moins méfiants à l'égard des hypothèses qui leur semblent au contraire habiller trop large, comme celles de Louis Dumont (l'individu Mans le monde", produit du judéo-christianisme), Aussi cherchent-ils plutôt à mettre en valeur des formes historiquement changeantes d'insertion des individus dans les groupes, par exemple les groupes religieux.

Bien loin de reproduire des modèles traditionnels, les recompositions modernes de la religion se caractérisent essentiellement par deux traits : l'individualisme et la dérégulation du rapport aux institutions religieuses et à la tradition en général. On remarque en effet que le plus souvent, les initiatives de l'innovation religieuse viennent de la base (des acteurs) et non plus du haut (des institutions). Ce qui autorise les sociologues de la religion à parler de "productions religieuses de la modernité". Les enjeux et les significations du religieux, et du lien social autour du religieux, diffèrent selon les milieux sociaux. Pour certains milieux minoritaires ou d'immigration récente, les "communautés traditionnelles" constituent encore des réalités, vécues comme pesantes et comme autant d'obstacles à l'intégration pour les uns, vécues comme autant d'agents de prévention de l'anomie pour les autres. Pour d'autres milieux, l'utopie d'un "retour aux communautés" constitue une voie d'évasion du réel. Pour d'autres enfin, la référence religieuse ne constitue qu'un stock de symboles disponibles et manipulables auxquels les acteurs individuels et collectifs recourent en vue de recompositions identitaires.

## 2 - PERSPECTIVES

En fonction des constats esquissés précédemment sur les dynamiques scientifiques, ainsi que des questions de société qui, à l'heure actuelle, paraissent porteuses d'interrogations majeures, un certain nombre d'axes méthodologiques semblent pouvoir être prometteurs.

## Prosopographie, microhistoire

La question de savoir si la période actuelle est marquée par la perte relative du "lien social" nécessite d'abord pour trouver réponse, des travaux historiques.

"Les durées" constituent une interrogation fondamentale pour l'historien, à laquelle il lui est néanmoins difficile de répondre. Les témoignages individuels et plus encore l'histoire orale révèlent combien est grand le décalage entre la chronologie vécue et l'Histoire avec un grand H, mais aussi combien, d'un individu à l'autre, le vécu temporel ne se mesure pas à la même aune. Nécessaire à l'interprétation, l'établissement du fait historique pose d'autant plus de problèmes que l'on ne dispose que de documents individuels livrant la durée propre à leur auteur.

Aujourd'hui, une solution semble résider dans l'approche prosopographique, conduite à partir d'une pluralité de sources sinon convergentes, tout au moins complémentaires. L'idée de base est de reconstituer la biographie collective d'un groupe social donné en trois temps : constitution d'un échantillon limité de représentants de ce groupe; établissement de fiches biographiques individuelles détaillées, mais dans des cadres homogènes; traitement statistique. La méthode présente l'avantage de faire apparaître des conclusions à la fois fondées statistiquement et assez riches pour alimenter de nouvelles problématiques; par contre, elle suppose un lourd investissement en temps et, presque toujours, un travail d'équipe; de surcroît, elle paraît mieux adaptée à l'étude des élites qu'à celle des couches sociales populaires. Elle doit cependant être encouragée, car il s'agit sans doute de l'une des méthodes les mieux à même de mettre à jour les réseaux et de faire apparaître comment se constitue le lien social.

La prosopographie a connu un renouvellement remarquable ces dernières années, notamment dans le cadre d'enquêtes collectives sur la genèse de l'Etat moderne. En effet, elle permet de préciser les types de carrières parcourues par les di-

gnitaires et les officiers au service du roi ou de l'Eglise, et ce faisant de mettre en lumière par recoupement les affinités entre familles ou les solidarités nées d'une même formation universitaire ou du service partagé d'un même prince. L'établissement de questionnaires tenant compte de tous ces facteurs et le traitement informatique ont assuré l'efficacité d'une démarche qui concilie les avantages du qualitatif et du quantitatif.

A côté des approches prosopographiques, une autre démarche qui semble aujourd'hui pleine de promesses est celle de la microhistoire, initiée en Italie sous le nom de *microstoria* et qui a reçu auprès de certains historiens français un accueil très favorable. Elle ne s'identifie pas à la monographie traditionnelle, dont le cadre d'observation résulte d'un découpage *a priori*, pour des raisons de commodité, de l'objet et de l'espace étudiés; de la juxtaposition de monographies répondant à un questionnaire plus ou moins commun, on attendait la possibilité assez illusoire d'une reconstruction en bout de course de la société globale. L'idée fondatrice de la microhistoire est que le changement de "focale" de l'objectif de l'historien n'est pas une opération innocente ni sans effet sur l'objet lui-même, mais qu'il transforme l'objet. Pour ce qui nous concerne, le choix du micro fait accéder à une densité et une complexité insoupçonnées des liens sociaux de toute nature : relations de couple, de parenté et de voisinage, identité individuelle et de groupe, stratégies et conflits les plus infimes, mais qui sont la trame des mots et des gestes quotidiens et qui déterminent largement les clivages et les choix individuels et collectifs à l'échelle du village ou du quartier. Cette approche autrement dynamique que la monographie close sur elle-même et figée dans ses procédures hiérarchisées de description, renouvelle en profondeur la conception de l'histoire sociale, en mettant en garde contre le trop facile transfert d'une même grille d'analyse d'une situation locale à une autre et contre le caractère par trop globalisant de catégories telles que celles de "culture villageoise" ou de "conscience ouvrière". En proposant de nouveaux outils d'analyse, la microhistoire s'ouvre au contraire au comparatisme entre situations locales analogues ou complémentaires.



## Systèmes de médiations et réseaux d'interface

Dans des domaines qu'on pourrait dire situés entre le macro-social et le micro-psychologique, l'échelle intermédiaire des systèmes d'interface, à l'intersection des institutions et des formes multiples de *groupements* sociaux, constitue un champ d'investigation qui a certes commencé d'être défriché en France, mais qui pourrait connaître de plus amples développements et mises au point méthodologiques.

Trois perspectives, au moins, dans l'approche des réseaux et des "mobilisations multisectorielles", peuvent être évoquées en référence aux interrogations sur le lien social :

- les réseaux d'interconnaissance, perçus à travers les interactions individuelles (amitiés, réputations, coopérations d'entraide), étudiés dans la perspective méthodologique de la *"network analysis"* américaine;

- les dispositifs d'interface institutionnelle, où l'interaction est à la fois individuelle et organisationnelle, et où l'enjeu méthodologique consiste à prendre en compte cette double dimension dans ses articulations internes;

- les réseaux d'infrastructures, qui sont également des réseaux de compétences et de déploiement de logiques professionnelles.

Ces trois orientations d'investigation, à partir d'échelles ou d'acteurs spécifiques, ont fait l'objet d'investigations spécialisées. Des confrontations entre problématiques seraient donc à envisager, notamment entre approches quantitatives et qualitatives des réseaux, et pour développer les investigations par rapport aux phénomènes politiques du conflit et du consentement.

En d'autres termes, il serait souhaitable que les diverses approches des réseaux aux échelles micro (interindividuelle) et macro (institutions, organisa-

tions) ne se développent pas séparément et puissent articuler leurs dimensions d'analyse; et que, par ailleurs, les configurations de ces relations (les contours des réseaux) soient interrogées par rapport aux normes, références et finalités qu'elles mettent en avant et en fonction desquelles elles se structurent.

La problématique de la "sociabilité", développée comme on l'a vu par les historiens, éclaire des formes sociales aujourd'hui non résolues, mais qui sont concurrencées par des modalités modernes de médiation, en particulier de nature professionnelle.

La technicisation et la professionnalisation ont marqué depuis plus d'un siècle des pans entiers du traitement de la question sociale et, par là, de la consolidation ou de la transformation du lien social. Les enjeux de ce développement et notamment les rapports ambivalents avec l'auto-organisation ouvrière ou rurale (associations, mutuelles, services...), les compromis institutionnalisés, de même que plus largement les rapports des bénévoles (militants) et des professionnels (par exemple dans le cadre des associations de la loi de 1901), restent insuffisamment connus.

En outre la crise des savoirs et des savoir-faire, l'apparition de la nouvelle pauvreté et l'inflexion libérale ou néo-libérale au sortir de l'Etat-providence, ont accéléré ces quinze dernières années des transformations structurelles du champ des qualifications orientées vers le lien social; or cette évolution reste aujourd'hui mal objectivée par la recherche. Ainsi, les effets de la double épreuve récente du tassement des budgets sociaux et de la décentralisation, tant sur le devenir des professions anciennes que sur les nouvelles professions naissantes dans l'espace local (chef de projet, ingénieurs sociaux, référents...), ne sont-ils certainement pas assez étudiés. De même, on note la consolidation d'une tendance ancienne à la "marchandisation" du lien social, pendant que l'action sociale devient comme jamais un marché ouvert quelquefois lucratif (troisième âge par exemple). Ces évolutions aux conséquences mal connues sur les équilibres sociaux ne sont pas non plus suffisamment explorés.

## Interdisciplinarité et transfert de modèles

Une nouvelle dynamique interdisciplinaire est à l'œuvre dans l'analyse de l'action collective.

L'action collective a été longtemps le lieu d'affrontements répétés entre des approches dites holistes et individualistes. Cette situation peut se trouver aujourd'hui transformée par des développements récents en économie (sur la façon dont les organisations, les règles et les savoirs collectifs suppléent à des défauts d'information), en sociologie (sur les modalités du jugement et de l'ajustement des actions), en droit (sur les cadres interprétatifs offerts par les règles), en anthropologie (sur l'inscription contextuelle de l'action et de sa compréhension), et en sciences cognitives sur l'ancrage pragmatique du raisonnement). Ces travaux peuvent contribuer à renouveler l'approche de l'action collective, en permettant *une* analyse des formes élémentaires de lien entre les acteurs prenant en compte la dynamique des repères et des objets collectifs. Les points suivants indiquent des rapprochements déjà engagés et des perspectives de recherche interdisciplinaires :

- une analyse des contrats, des transactions, ou des interactions sociales qui prend en compte les anticipations, les attentes et les interprétations des acteurs;

- une attention au rôle des médiations (règles, conventions et objets communs) dans la coordination, allant de pair avec la reconnaissance des limites des processus cognitifs et de l'information disponibles aux acteurs;

- un souci de prendre en compte les dynamiques d'ajustement mutuel ou de remise en cause des liens, ce qui suppose de ne pas réduire l'action à une décision, à un plan ou à un programme.

Par ailleurs, l'exercice du transfert des modèles peut s'avérer fécond. Il doit être bien distingué de l'interdisciplinarité. Il s'agit plutôt de chercher à déplacer les regards habituels, à mieux saisir la diver-

sité considérable des aspects de la socialisation et d'analyser les modes de construction des catégories et des conduites.

Par exemple, les questions liées aux relations entre l'accès à l'emploi et les mutations du travail d'une part, les apprentissages scolaires et post-scolaires et leurs effets sur l'intégration urbaine et sociale d'autre part semblent tout à fait prioritaires quant à la construction du lien social. Le cloisonnement des champs (travail / éducation / ville...) et des disciplines (psychologie / sociologie / économie...) est très préjudiciable au développement de recherches sur les interactions entre les divers processus de socialisation (travail et emploi; formation et école; habitat et ville).. Il faudrait trouver des objets intégrateurs, obligeant à la fois à transgresser les champs établis et à faire dialoguer les disciplines.

Il ne fait guère de doute, par exemple, que l'histoire sociale des élites intellectuelles emprunte largement à la sociologie et à l'anthropologie. Il en est de même pour la sociologie américaine dont s'inspirent les historiens de la ville s'intéressant aux mobilités urbaines. L'histoire économique a de même beaucoup bénéficié des apports des théoriciens américains de la gestion, de l'organisation des entreprises et, plus récemment, de la culture d'entreprise. Le transfert s'est le plus souvent opéré par l'entremise d'historiens d'Outre-Atlantique. Néanmoins, les transferts directs ont existé : ainsi en matière d'histoire de l'innovation, les historiens français ayant puisé leur inspiration auprès des économistes anglo-saxons eux-mêmes. Par ailleurs, les économistes français - ceux par exemple de l'école de la régulation salariale - ont de leur côté alimenté d'importants travaux d'historiens susceptibles d'apporter des éclairages neufs sur la "constitution, du lien social". L'histoire emprunte beaucoup, mais elle donne aussi. L'œuvre d'un F. Braudel le montre : l'histoire a transmis son ambition d'une approche globale, favorisant ainsi la remise en cause de déterminismes simplistes.

Dans le champ de la démographie, certaines notions viennent à être remises en cause, à la lumière notamment d'une meilleure compréhension

des différentes influences exercées dans la constitution de la discipline, notamment celle de la biomédecine. Des travaux montrent comment les notions de fécondité et surtout de vieillissement sont empreintes de présupposés biologiques qui peuvent conduire à des ambiguïtés et à des confusions regrettables. Il importerait donc de reconstruire des notions plus "autonomes" qui rendraient mieux compte des réalités dans ce domaine.

La mise en scène simultanée de plusieurs systèmes structurant et régulant une société est pleine de promesse. Les recherches qui ont repris les données épidémiologiques et médicales pour les soumettre au questionnement anthropologique ont déjà donné des résultats intéressants, tant au niveau de l'intelligence de l'histoire des maladies qu'à celui de l'analyse des représentations. Beaucoup des recherches actuelles sur le sida voient dans la maladie le résultat d'un ensemble construit d'interactions économiques, culturelles et biologiques.

De même, la confrontation des sphères économiques et démographiques doit permettre une meilleure compréhension des nouveaux modèles familiaux expérimentés aujourd'hui.

Pour finir, il nous reste à évoquer des questions ouvertes qui pourraient constituer autant d'axes de recherches à venir :

- l'invention de la tradition;
- les constructions nationales : comment devient-on / fait-on une nation ?
- les marchés économiques modernes : ils ont détruit des liens sociaux, déstructuré des "communautés", déplacé, isolé, etc. et, en même temps, ils ont quand-même créé du "lien";
- les "marchés électoraux" : ici encore, il y a des effets de déstructuration de liens "traditionnels", avec des technologies institutionnelles spécifiques (l'isoler !), et, en même temps, des effets incontestables de structuration;
- les liens familiaux, amicaux, sociaux;
- la notion de solidarité dans des aires culturelles différentes;
- les relations de confiance, le contrat, la citoyenneté;
- les "lois du silence", le secret (administratif, mafieux, etc.).

Texte rédigé sous la responsabilité de  
**Jean-Claude Schmitt**  
*Président du groupe 20*



# 21

## PATRIMOINES, CULTURES ET SOCIÉTÉS

### INTRODUCTION

L'idée de patrimoine a éclaté dans une pluralité de sens. Il est difficile de rendre compte d'une telle diversité. Nous proposons, connue principe de lecture, les relations entre la conservation patrimoniale - ses objets, ses moyens, ses finalités - et les perspectives de recherche. Ces dernières peuvent concourir à l'élaboration des patrimoines passés et futurs, en tenant compte des métamorphoses des sociétés contemporaines. Après avoir considéré les divers fondements des patrimoines, notre objectif est de montrer :

- les rapports entre la recherche, la conservation et la transmission,
- la diversité culturelle manifestée par les langues et les territoires,
- le devenir de la culture scientifique et technique,
- l'éclatement des représentations de l'histoire et ses incidences sur l'histoire "au présent",
- la consommation massive de la culture et la patrimonialisation de la création artistique.

Nous avons pris le parti de présenter comment la question *des* patrimoines est au cœur des

métamorphoses culturelles des sociétés. Ce qui pourrait apparaître comme un paradoxe quand on réduit la patrimonialisation à l'acte banal de la conservation.

La conservation des patrimoines apparaît comme une évidence aujourd'hui. Mais l'acte "institutionnel" de protéger des monuments a été posé au cours de la Révolution Française, dans une période où la destruction des églises et des châteaux risquait de ne connaître aucune limite. L'abbé Grégoire soumet à la Convention un rapport dont l'objectif est de sauvegarder des monuments et d'organiser des "dépôts" de biens patrimoniaux qui seront un jour les musées de province. Quelques années plus tard, la notion même de "monument historique" est définie, non seulement pour des sites et des édifices, mais aussi pour des objets qui illustrent l'histoire nationale. C'est la première fois que le phénomène de transmission culturelle est institutionnalisé comme l'expression du passé indestructible de la nation.

Ultérieurement, des stratégies de conservation sont donc mises en place, et la prise de conscience de la valeur historique et esthétique des monuments et des objets ne cesse de s'accroître. En 1830 est créé le poste d'inspecteur général des monuments historiques dont la fonction est d'abord d'établir un inventaire de tous les édifices qui témoignent du passé en vue d'assurer leur protection. En 1887, la Commission des Monuments his-

toriques établit un projet de loi destiné à assurer la conservation des monuments et des objets d'art en reconnaissant leur "intérêt général". Et, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, une multiplicité d'associations de sauvegarde se donne pour finalité de défendre la nature autant que les monuments, induisant déjà cette idée de paysage, les édifices participant d'une beauté de la nature qu'il est nécessaire de protéger. C'est aussi l'époque d'une exaltation de la ruine qui n'est pas considérée comme le symptôme de la destruction. Au XX<sup>e</sup> siècle, et jusqu'à nos jours, les patrimoines feront de plus en plus l'objet de l'attention collective, dans un souci, non seulement de conserver les grands symboles de l'histoire locale et nationale, mais aussi de transmettre des messages culturels, un certain "sens" de l'Histoire, aux générations futures.

Une telle organisation de la sauvegarde répond-elle à la crainte toujours amplifiée de la catastrophe ? Est-ce la peur de la disparition des traces du passé qui anime ce qu'on pourrait parfois tenir pour une "obsession de la conservation" ? La légitimité de la transmission patrimoniale ne fait aucun doute, mais elle peut parfois conduire, à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, à des excès de "muséographie". Face à la déstructuration des territoires provoquée par les grandes mutations industrielles, les logiques de conservation semblent offrir une réponse concrète en promouvant des décisions et des actes de restitution des biens culturels et de leur pouvoir symbolique. Dans un monde en changement constant, cette représentation de la durée, de la continuité ne peut que rassurer puisqu'elle trace et donne un sens au futur. Quand on parle de "patrimoines de demain", ne laisse-t-on pas entendre que le décor symbolique de nos sociétés en crise ne doit pas être menacé de disparaître et qu'il doit se construire sans cesse ?

Ce qui change désormais, c'est le rapport à la monumentalité. Puisque les patrimoines sont partout, ils ne concernent plus seulement les édifices classiques, ils deviennent les restes sacrés des sociétés en pleine métamorphose. On dépasse alors la seule idée de la sauvegarde pour accéder à celle d'une transmission presque fictionnelle. Au-delà du

respect de l'Histoire et de l'authenticité des symboles, les patrimoines permettent aussi de construire une projection de l'avenir des sociétés. La sauvegarde trop systématique peut alors perdre son aspect "réactionnaire" pour entrer dans la grande scène du jeu des identités. Tout le problème aujourd'hui est de savoir comment concilier les logiques de la conservation à des formes originales de transmission, des formes qui ne cessent d'intégrer les métamorphoses culturelles du temps présent. L'archivage prend une place essentielle dans cette transmission parce qu'il constitue à la fois les stocks et les flux de la culture.

## PATRIMOINES ET CULTURE LES ENJEUX

Les représentations communes des patrimoines dépendent de la production du "mémorable" par des signes, des objets, des lieux qui attestent de la finalité même de la conservation. Un tel entretien patrimonial des mémoires apparaît comme un moyen "thérapeutique" pour renforcer les représentations des liens culturels et sociaux rompus par des crises, des guerres ou des mutations. Cet effet de liaison peut inciter à considérer la gestion des patrimoines sous une forme dynamique et prospective. La relation entre "mémoire" et "patrimoine"<sup>11</sup> permet des formes d'anticipation : mémoires de demain et patrimoines de l'avenir ne sont pas seulement des slogans promotionnels, ils désignent, par delà leurs effets prospectifs, des tentatives de liaison entre le passé, le présent et le futur.

Il ne faut pas confondre un éclatement de la notion de patrimoine avec la simple multiplicité des patrimoines. C'est dans le contexte d'une réflexion collective sur toutes les menaces de destruction que la question du patrimoine interfère avec celle des modalités de prémunition, de gestion des risques, de sauvegarde de l'humanité. Les convergences des

politiques culturelles en matière de gestion des patrimoines ne sont peut-être pas évidentes. Des oppositions semblent persister, ne serait-ce qu'au niveau des définitions de base : la distinction, par exemple, entre patrimoine culturel et patrimoine naturel est encore utilisée pour signifier des ordres différents de traitement mais aussi pour consacrer des finalités propres à des institutions. Une telle distinction peut paraître fondamentale au niveau même du choix des opérations. Quand on parle de patrimoine génétique, on est loin de penser d'emblée à une question de transmission des valeurs culturelles, et le débat éthique autour de l'eugénisme ne manque pas de resurgir... Autrement dit, les rapports complexes entre les secteurs de recherche concernés par la problématique des patrimoines semblent apparaître autant au niveau des pratiques de gestion qu'à celui des investigations scientifiques.

Qu'en est-il des stratégies de la conservation ? La muséographie n'est pas la unique finalité du stockage des objets culturels, de la protection des espèces de la faune et de la flore, des formes de la sauvegarde de l'espèce humaine... La fécondation artificielle, les transplantations d'organe, les banques de sperme, les pratiques de la conservation *in vitro* usent de techniques qui tendent à déstabiliser les références usuelles de l'idée de patrimoine. Les représentations de la transmission participent d'une interrogation collective éthique sur les effets du développement des recherches concernant l'hérédité. La constitution récente des "comités d'experts" en matière de bio-éthique est révélatrice de l'enjeu provoqué par toute modalité prospective de la génétique. Sans aller jusqu'à cette vision catastrophiste d'un savant autrichien, qui proposait de lancer dans le ciel des embryons congelés pour que des traces de l'espace humaine survivent à un holocauste nucléaire, il est nécessaire de considérer comment une conservation "prospective" dans le domaine de la génétique crée une "autre" généalogie du sens de la référence au patrimoine. Face à l'angoisse de la stérilisation, la gestion des ressources génétiques est en perpétuelle évolution, elle fait des patrimoines de la flore et de la faune un potentiel sauvegardable pour l'expéri-

mentation et le témoignage. Quel sens donner à une conservation prospective et à une mise en exposition des territoires, des réserves naturelles et des parcs zoologiques ? S'agit-il seulement de répondre indéfiniment à l'urgence d'une menace de la stérilisation ou de la catastrophe ?

Le patrimoine, c'est aussi l'héritage. Sa visibilité ne se traduit pas seulement par l'acquisition des biens, elle se manifeste dans la "mise en scène" des stratégies et des projets. Pour une analyse des phénomènes patrimoniaux et des formes actuelles de la gestion culturelle des mémoires, le concept de "transmission"<sup>11</sup> permet d'aborder les interférences entre toutes les sciences. Il est au cœur de la reproduction et de la déstabilisation. Transmettre, c'est aussi organiser une certaine logique du sens. Dès lors, les patrimoines peuvent être inventés, ils supposent une certaine activité créatrice, un patrimoine urbain peut être construit autour de tel lieu symbolique choisi plutôt que tel autre, selon l'arbitraire des stratégies de politique culturelle. Et les conceptions de l'organisation de l'avenir déterminent en partie les actes et les choix de la conservation présente, elles impliquent des tendances prospectivistes dont la légitimité ne dépend pas que des pouvoirs politiques. Par-delà les conflits idéologiques qu'elles révèlent, un consensus relatif semble nécessaire. Comment ce dernier peut-il s'établir sans risquer de niveler l'hétérogénéité vivante des différences culturelles ? Le domaine des "ressources naturelles" et celui des "ressources culturelles" peuvent paraître institutionnellement séparés, mais l'invocation de l'instance patrimoniale traduit des convergences de stratégies.

La gestion des patrimoines pose aussi la question de l'évaluation des patrimoines. Quelle valeur donner aux structures du patrimoine ? La comptabilité des patrimoines demeure d'autant plus complexe que les définitions sont dépendantes des possibilités d'appréhension des éléments constitutifs des patrimoines (différence entre le patrimoine financier et non financier...). Car inventorier les patrimoines ne suffit pas, il s'agit aussi de les mesurer. Les actifs patrimoniaux supposent autant une approche de ce qu'ils coûtent que de ce qu'ils repré-



sentent dans le futur. Comment forger une élaboration conceptuelle qui tienne compte de la relativité même des principes d'évaluation ? Stratégie de la conservation et mise en valeur des patrimoines soulèvent des problèmes économiques. L'idée de patrimoine esc d'abord liée aux questions de l'épargne, du capital, de la propriété foncière... Quel est alors le rôle de l'Etat dans la gestion des "biens communs" ? il ne s'agit pas seulement de faire fructifier les objets et lieux conservés, mais de savoir si le patrimoine devient le grand luxe de la conservation des sociétés. En épousant exclusivement une fonction culturelle prépondérante, comment peut-il participer du devenir même de l'économie ? De plus, la multiplicité des patrimoines bouleverse la référence classique à la rareté : si de plus en plus d'objets et de lieux sont sauvegardés, comment peut fonctionner un principe d'évaluation dont le fondement est justement la discrimination des "choses rares" ? Il est vrai que le culturel suppose des dépenses somptuaires et qu'il participe d'une certaine éthique de la "gratuité"... Mais la muséographie du monde coûtera sûrement trop cher pour que puisse persister cet idéalisme d'un don non réciproque des Etats. La gestion des ressources naturelles fait bien apparaître cette nécessité de traiter les usages multiples et prospectifs des patrimoines. Toute la gestion de l'espace doit s'investir dans des phénomènes d'interdépendance entre des facteurs naturels, humains, culturels... En suscitant une interrogation éthique constante, l'idée de patrimoine n'est plus réductible à une gestion de la sauvegarde et de la conservation, même prospective des sociétés, elle appelle une réflexion sur le devenir de l'humanité, sur l'universalité d'un sens pluriel de la transmission. Utiliser la seule arme de la menace (disparition des traces, stérilisation, désastre...) risque d'être dangereux dans la mesure où la pré-munition peut se donner sa propre finalité. Si l'oubli est fondateur de la mémoire, l'abandon ou la destruction peuvent aussi être la part maudire et nécessaire des patrimoines. Mais à quel titre peut-on évaluer ce qui devrait disparaître ? La muséographie du monde, même si elle paraît "vivante", trahit cette angoisse d'une incertitude de l'évaluation de la disparition. En cherchant à tout conserver, les gestionnaires des patrimoines évitent de

gérer les mutations, ils se donnent comme défi ultime, la résistance farouche au théâtre d'une menace polyvalente des catastrophes et des destructions.

Dans ce contexte des métamorphoses culturelles, l'interdisciplinarité permet de penser que les différents secteurs de recherche participent du développement culturel des sociétés. Dans ce sens, le problème de la conservation des objets, des archives, des documents ou de la mémoire des recherches n'est pas unique. S'il se pose, c'est dans le cadre d'une dynamique prospective qui est inhérente à la recherche scientifique elle-même. Si la conservation est un moyen essentiel de défendre une singularité de la culture d'entreprise, elle ne doit pas devenir pour autant une "obsession patrimoniale". L'enjeu exclusif n'est pas de sauver des collections, mais de pouvoir assurer des modalités diversifiées de transmission culturelle. Paradoxalement, une conception plus "futuriste" du patrimoine devrait permettre de développer des formes de transdisciplinarité au lieu de conduire à un sur-investissement patrimonial, dans le domaine propre à chaque secteur scientifique.

## **L'EVOLUTION ET LES TENDANCES DE LA CONSERVATION PATRIMONIALE**

Dans tous les secteurs du CNRS, la question du patrimoine est récurrente. Il est difficile d'en rendre compte de manière exhaustive, nous choisirons donc les questionnements les plus significatifs par rapport aux formes actuelles du développement culturel. Il existe trois grands problèmes essentiels.

- Les chercheurs sont d'abord soucieux de conserver leurs propres archives, leurs instruments de laboratoire mais ils ne peuvent pas déterminer une stratégie de "stockage". Celle-ci n'aurait guère

de sens si elle s'imposait comme l'unique finalité d'une telle conservation. Mais il ne faut pas oublier que c'est de l'ensemble même de l'histoire propre à chaque laboratoire que survit l'image culturelle du CNRS.

- Les chercheurs du CNRS participent à un travail de développement culturel quand ils sont invités, en tant que spécialistes, à la réalisation de différentes opérations (fouilles, recherches pour la muséologie, développement de la culture scientifique et technique, études ethnographiques, approches historique, géographique, linguistique...). Ce rôle de spécialiste est parfois entravé par le manque de cohésion et de concertation entre le CNRS et les autres instances, le plus souvent ministérielles.

- Les représentations de la culture ayant changé, la question des patrimoines ne peut plus être réductible à une logique de la conservation, du stockage et de l'archivage. Le CNRS, en tant que tel, est un lieu multiforme de promotion culturelle et les recherches, dans tout leur ensemble, participent de la construction et de la dynamique de la culture. Dès lors, le patrimoine ne suppose pas une attitude de repli, mais au contraire, un moyen, parmi d'autres, du développement culturel. Le CNRS joue alors simultanément un rôle de producteur et de transmetteur de la culture.

## 1 - RECHERCHE, CONSERVATION ET TRANSMISSION

Les relations entre la recherche et la transmission culturelle sont complexes. Nous prendrons un exemple, celui de l'archéologie. Un des problèmes majeurs est de préserver des exigences scientifiques en matière d'exposition ou dans la "mise en public" d'un site découvert. On sait combien les chercheurs sont invités à donner leur avis scientifique, mais cela ne suffit pas. En même temps, la découverte et la mise en exposition d'un patrimoine impliquent nécessairement une mise à disposition publique. Celle-ci se fait-elle au détriment de la rigueur scien-

tifique? Le patrimoine, tout comme l'environnement, n'est plus l'affaire de quelques-uns, c'est devenu un fait de société, et à ce titre il peut être l'objet de toutes les récupérations.

L'archéologie, dont l'étude porte sur l'analyse des vestiges matériels, témoins ultimes de sociétés, de culture, de civilisations passées et souvent perdues, présente une des seules approches capables de satisfaire la quête d'identité des groupes sociaux. Les bouleversements de la vieille Europe, tout comme les tentatives actuelles de desserrer le centralisme en France, entraînent une demande sociale très forte de reconquête d'une identité culturelle et historique. Elle s'exprime à la fois dans l'intérêt des régions, des pays pour leur patrimoine local et dans le besoin d'une histoire plus universelle. Seulement, le prétexte de la reconquête des identités culturelles est parfois susceptible de s'effectuer au détriment de l'exigence scientifique. On sait trop combien le conservatisme le plus farouche peut se réfugier dans la défense des identités comme si les lieux et les objets n'avaient plus qu'une fonction identitaire.

L'archéologie métropolitaine française a connu dans les années 80 une explosion de la recherche de terrain, à l'occasion des sauvetages rendus nécessaires par les grands travaux (TGV, autoroutes, rénovation des centres urbains). Ces sauvetages ont apporté une masse de données nouvelles qui bien souvent ont totalement renouvelé nos connaissances. Lors des phases de collectes de données, prospection et fouille, l'archéologue peut adopter deux attitudes différentes :

- la première consiste à affirmer une neutralité totale dans sa quête afin d'aboutir à une description exhaustive des vestiges découverts : ce qui conduit à faire des choix inconscients...

- la seconde consiste à admettre qu'on ne voit bien que ce que l'on connaît et qu'il n'y a pas de bonnes fouilles sans problématiques préalables.

La réalité archéologique est tout autre : la réflexion historique préexiste au premier coup de

pioche, les objets ne deviennent signifiants que si leur contexte est compris et analysé à travers le crible d'un savoir acquis au cours des expériences précédentes. Il existe donc autant de stratégies d'intervention que nous avons de questions à poser et d'hypothèses interprétatives à suggérer. L'approche proposée à partir d'un savoir de référence extérieur devrait alors permettre une meilleure sélection des observations à recueillir et une plus grande efficacité de l'archéologie de demain.

Il serait donc profondément dommageable de voir se développer en France une archéologie à plusieurs vitesses, Il est du rôle de nos institutions de gérer conjointement la collecte *des* données et leur exploitation scientifique. Dans cette forme de collecte qu'est la fouille archéologique, le chercheur ne peut se désintéresser du suivi des collections ainsi constituées; bien que ni la restauration ni la conservation n'entrent dans ses attributions, il a une responsabilité intellectuelle envers ce patrimoine. Si la gestion des archives-papier est maintenant satisfaisante, la solution pour le mobilier de fouilles n'est pas encore trouvée. On confond quotidiennement par exemple le nettoyage du métal pour l'étude et la consolidation du matériel, indispensable dès la découverte de ce témoin des cultures passées, avec la restauration muséographique, très onéreuse et réservée aux objets à présenter au public. Ni les musées, ni les dépôts de fouilles n'apportent aujourd'hui de solution, d'où perte, dégradation, destruction même... Il manque dans notre système des "archivistes" de vestiges matériels, chargés de gérer, classer, stocker, contrôler, mettre à disposition tout ce matériel indispensable à la science historique, mais qui n'ont pas vocation à être exposés. Il est rare que la dévolution des collections soit décidée dès la fouille, ce qui entraîne une absence de décision parfois préjudiciable à la bonne conservation des objets et des structures.

On ne peut donc que s'inquiéter du désintérêt actuel des pouvoirs publics pour les musées conservatoires. Certes ils ne font pas recette par des expositions grand spectacle, mais telle n'est pas leur fonction. Leur rôle est de rassembler un certain type de documentation, de la rendre accessible aux

chercheurs et aux étudiants; ce sont des lieux indispensables au progrès de la recherche historique, car ils rassemblent à des fins comparatives des vestiges matériels récoltés en fonction de problématiques scientifiques. La mise en valeur scientifique du patrimoine passe par l'élaboration de grands instruments de référence : corpus, catalogues scientifiques, bases documentaires, bibliographies. Une collection non étudiée est très vulnérable (risque accru de pertes, de vol). La contribution des chercheurs du CNRS dans ce domaine reste essentielle.

Ainsi, une question fondamentale est de savoir s'il est utile de développer "une culture savante" et "une culture profane", l'une répondant aux exigences scientifiques, l'autre satisfaisant les goûts du spectacle pour le grand public. Le critère touristique qui finit par déterminer les stratégies de promotion culturelle ne peut que se fonder sur des compromis, comme en atteste l'expérience des expositions.

Durant *ces* dernières années, on a assisté à un développement du nombre des expositions tant au niveau national qu'aux niveaux régional, départemental et municipal. A l'organisation de ces expositions participent presque toujours des chercheurs CNRS, inventeurs des découvertes (sites et collections) et/ou conservateurs de ces collections. Si certaines de ces expositions sont le reflet d'un travail scientifique en profondeur, d'autres - et cela très souvent selon la volonté des collectivités locales qui en sont les bailleurs de fonds - ne sont qu'une "mise en scène" des objets, et l'exposition, au lieu d'être au service du patrimoine et du travail scientifique, devient une fin en soi. Certaines collectivités désirent organiser des expositions annuelles pour des raisons purement politiques, mais, sans véritable programme, il faut toute la pugnacité des responsables de musées et de collections ainsi que des équipes scientifiques pour imposer des thèmes de prime abord difficiles, mais qui se révèlent porteurs d'intérêts nouveaux dans le public.

Il reste difficile de trouver une harmonie entre l'exposition temporaire et les collectes durables. Et le problème apparaît au niveau des catalogues dont le but médiatique est parfois cause de réduction



scientifique. Peut-on se contenter du catalogue d'accompagnement d'exposition qui, même s'il est de bon niveau dans le meilleur des cas, se situe entre la publication scientifique et l'ouvrage de vulgarisation ? Très souvent le catalogue d'exposition devient la publication définitive. Or les données qu'il contient ne sont pas suffisantes pour une exploitation ultérieure. Ici se pose le problème de la publication scientifique qui est indispensable au progrès des connaissances des sociétés du passé. Sans publication, la fouille archéologique n'a aucune utilité, et peut être considérée comme une destruction irréversible, avec perte irréversible des archives conservées dans le sol.

## 2 - L'HÉTÉROLOGIE CULTURELLE : LANGUES ET TERRITOIRES

La diversité des langues passe le plus souvent pour l'expression même des richesses culturelles inépuisables. On peut imaginer que, dans une future Europe qui va inclure bon nombre des pays de l'Est, les identités culturelles se maintiendront d'abord par la singularité des langues. C'est peut-être un paradoxe, mais il est difficile d'admettre qu'au nom d'un universalisme les différences culturelles soient appelées à disparaître. Traditionnellement, ce sont la langue et le pays qui traduisent à la fois la conservation et la métamorphose des patrimoines. Les langues et les paysages ont-ils tendance à subir une uniformisation ?

Pour le linguiste, le premier patrimoine est la langue et son produit, le discours. La langue et l'immense diversité des langues humaines, le discours et sa textualité, orale ou écrite. La langue saisie dans son éco-système, la culture, mais aussi en tant qu'elle-même expression culturelle et sédimentation du vécu d'un peuple, jusque dans sa forme extrême de langue reconstruite, unique témoignage de l'existence de populations, lorsque aucun texte, aucun monument, aucune trace ne permet d'attester leur existence, comme c'est le cas pour ceux que l'on désigne sous le nom d'indo-Européens, d'Ouraliens, de Tibéto-Birmans ou d'Algonkins.

Plus communément, on se réfère aux divers corpus enregistrés :

- échantillonnages de langues les plus diverses recueillies *in situ* (linguistique dite "de terrain"),
- témoignages d'états différents d'une même langue et de la variété de ses usages selon les variables géographiques et sociales.

Nous disposons, pour ce qui est du français, d'un outil exemplaire ; l'INALF (Institut National de la Langue Française), dont le siège est à Nancy, et dont le programme scientifique rénové comprend deux axes : l'exploitation d'une base textuelle et un ensemble de recherches en lexicologie française. La base textuelle est, avec 160 millions d'occurrences, la plus importante du monde. À la suite de l'achèvement du *Trésor de la Langue Française*, les recherches en lexicologie visent essentiellement à approfondir la dimension historique, en accenmant l'ouverture sur le français contemporain, en décrivant les usages non littéraires (langues parlées, argotiques, scientifiques et techniques).

En ce qui concerne les autres langues que le français, la recherche est assurée par diverses unités qui privilégient la recherche sur le terrain, la thématique de l'oralité et une approche multidisciplinaire de type ethnolinguistique. La plupart de ces unités (UPR, UMR, URA) spécialisées dans diverses aires géographiques, ont accumulé une masse inégalée de matériaux. Celle-ci peut être exploitée d'une manière multidisciplinaire et est susceptible d'interroger les sciences du langage, de la communication et les sciences cognitives sous des formes inattendues et défiant tout acquis. Ces recherches, de par leur étendue géographique et la diversité des terrains, apportent à la recherche fondamentale une expérience incomparable dans la rencontre d'autrui langagier et culturel. Il s'agit d'un apport massif de matériaux diversifiés et de qualité qui véhiculent une vision du monde et témoignent de représentations dont la spécificité défie la théorisation la plus avancée. Ils constituent ainsi un réservoir incomparable et, en même temps, une constante in-

terrogation épistémologique venant d'ailleurs. La recherche fondamentale a besoin de cet apport.

Les implications de la langue paraissent de plus en plus répondre à une exigence d'universalité dans les technologies de pointe, dans l'acquisition des langues étrangères, dans les techniques de communications ou encore dans les rapports entre les activités langagières et les cognisciences. Ce développement, parfois vertigineux, n'est pas contradictoire avec la diversité des langues et leurs traditions patrimoniales, mais leur relation harmonique reste problématique. Les technologies de communication introduisent des modes communs de rechange qui peuvent sembler destructeurs d'une certaine hétérologie des langues. Comment peuvent se concilier la dynamique culturelle d'un langage de plus en plus universel et la puissance des identités langagières ? Une société moderne ne saurait se retrancher derrière les vertus d'une authenticité originaire de la langue sans risquer de s'enfermer sur elle-même. Un phénomène similaire apparaît avec les territoires qui sont les lieux d'expression et de transmission, des valeurs patrimoniales. On sait que les réflexions sur l'environnement conduisent à repenser l'autonomie territoriale tout en la conjuguant à des normes de régulation universelle. Là encore, le problème est de taille : comment concilier une hétéronomie territoriale et langagière avec la nécessité d'une homogénéisation culturelle ?

Depuis un certain temps, on parle de la conservation des paysages pour restituer aux territoires leur pouvoir symbolique. Mais cette protection des paysages pose en effet un problème d'une ampleur plus grande que celle des objets manufacturés dans la mesure où l'un de ses caractères fondamentaux réside dans son inéluctable évolution consécutive à celle des activités humaines ou à celle de la nature. Les procédures de protection (classement des sites, inscription, des sites, ZPPAU, périmètres sensibles...) sont cependant toujours utilisées par les divers niveaux de l'administration, et Ton peut même affirmer que le classement (protection dure) connaît en ce moment un regain de faveur, l'administration centrale ayant engagé des ac-

tions de classement sur des sites très étendus. Les opérations "Grands Sites" menées par le Ministère de l'Environnement et le Ministère de l'Équipement mobilisent des moyens considérables (exemple : la Pointe du Raz).

Pour contourner les difficultés relatives à la protection, on a vu apparaître depuis quelques années la notion de "gestion des paysages" qui implique une évolution maîtrisée, mais qui ne remet pas en question les caractères essentiels de la qualité de ces paysages. On peut d'ailleurs se demander comment cette qualité (qui pose problème en elle-même) peut être conservée si l'évolution continue, le caractère particulier d'un paysage tenant quelquefois à la présence d'un seul élément susceptible de disparaître rapidement sous l'effet d'une mesure économique ou de l'apparition d'une nouvelle technique; par exemple, les arbres émondés en "têtards" de certains paysages de Normandie ou de la Loire sont fortement remis en cause par les directives agricoles de la CEE ou par l'apparition de machines à raiiler qui changent les formes de taille.

Cette socialisation des paysages multiplie en fait les conflits interdisciplinaires ou internes aux administrations, les paysages étant devenus un enjeu très fort de l'aménagement du territoire ou de la gestion de la culture. Les diverses institutions de la Culture, de l'Équipement ou de l'Environnement se disputent cet objet "patrimonial", le Ministère de l'Équipement qui avait en charge la gestion des sites et paysages protégés s'est vu très récemment retirer cette tâche au profit du Ministère de l'Environnement (en réalité, double tutelle, une seule responsabilité ministérielle). En fait, les paysages posent d'emblée une question d'identification. Aux méthodes purement géographiques qui étaient utilisées il y a quelques années, s'ajoutent aujourd'hui des méthodes plasticiennes, fondées sur l'analyse des formes et des couleurs, et très récemment, certains chercheurs ont introduits des méthodes fondées sur l'analyse des représentations sociales des paysages. Celles-ci ont été d'ailleurs appliquées ou sont en cours d'application sur plusieurs régions françaises (vallée de la Loire), Cette méthode

d'identification est en fait fortement discutée par certaines tendances qui souhaiteraient voir identifier les paysages grâce à des critères intrinsèques et non grâce à des critères tenant à la valeur sociale qui leur est accordée.

La tendance qui se dessine actuellement en Europe consiste à attribuer aux paysages une valeur de reconnaissance sociale à diverses échelles, internationale, nationale, régionale, locale. Cette méthode découle de l'analyse des représentations sociales et met en avant l'échelle locale considérée également comme un échelon inévitable de l'aménagement du territoire. Cependant, cette méthode est soumise à l'ambiguïté de l'évolution de la demande sociale. Il semble en tous *cas* que la tentative de calcul de la valeur d'un paysage, qui avait été envisagée il y a quelques années (selon le coût de reconstitution d'un paysage à l'identique) ait été abandonnée. Enfin le problème de la gestion de ce patrimoine paysager, lié à la question de sa définition, renvoie à des problèmes d'esthétique et d'éthique. Certains considèrent en effet que la protection des paysages telle qu'elle a été envisagée jusqu'à aujourd'hui s'oppose au caractère essentiellement vivant du paysage et qu'elle donne à cet objet la valeur d'une image (et de cette seule image détachée de son contenu) et non d'une expression visible de savoir-faire du vivant. C'est en ce sens que la création des "parcs culturels paysagers" serait projetée, afin de briser l'idée que le paysage est uniquement un tableau destiné à la contemplation et non un cadre de vie où évoluent des populations.

Langues et territoires : les enjeux des patrimoines deviennent plus que jamais des phénomènes prospectifs de la culture dans ses clivages entre son hétérogénéité et son homogénéité. Comme le montrent les recherches effectuées par la Mission du Patrimoine Ethnologique et le CNRS, la question récente des paysages se pose à partir des modes de vie sociaux et culturels, à partir des coutumes langagières, est bien évident qu'on ne peut pas sauvegarder (ou geler) des territoires pétrifiés et des langues mortifiées aux seules fins d'une muséologie trop conservatrice.

### 3 - LA CULTURE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Il n'est pas nécessairement judicieux de considérer que les rapports entre la culture et la science passe d'abord par la question des patrimoines. Les chercheurs scientifiques sont soucieux de conserver des archives et des instruments, mais Us ne peuvent se limiter à cette seule perspective d'une accumulation démonstrative de l'histoire de leurs recherches. Les astronomes, par exemple, ont toujours été très concernés par le patrimoine puisque l'astronomie a besoin de séries continues d'observations étendues dans le temps et réalisées si possible avec les mêmes instruments et dans les mêmes sites. Il suffit de dire que la vie utile moyenne d'un instrument astronomique se situe autour de 100 ans pour comprendre l'attention particulière portée aux instruments, aux archives et également aux bâtiments. Mais cette pratique de la conservation poursuit une tradition muséographique qui a déjà été mise en forme par le développement des écomusées, des musées des techniques et, plus récemment, par la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris (La Villette). Il en résulte une démonstration convaincante de la richesse des inventions techniques et scientifiques, mais celle-ci semble, pour ainsi dire, séparée du monde de la recherche scientifique. La fonction didactique des lieux d'exposition finit par donner une image très stéréotypique de l'histoire même des sciences et des techniques. Il faudrait considérer comment la science introduit des métamorphoses essentielles de la culture et de la société, des changements de mentalité.

Par exemple, la physique nucléaire et la physique des particules sont devenues peu à peu un des terrains privilégiés de ce qui est communément appelé la "*big science*", tout en restant des exemples caractéristiques de "Sciences exactes". À ce titre, elles contribuent, avec d'autres sciences d'ailleurs, à forger peu à peu une culture et une mentalité scientifique s'opposant, par certains côtés à la culture ancienne plus axée sur les "humanités classiques". Il est clair que l'un des rôles des scientifiques et du CNRS doit être d'aider à promouvoir



cette culture nouvelle, sans en laisser le soin aux seuls ressorts économiques, commerciaux ou purement administratifs.

Ainsi, les perspectives envisagées dans le milieu Physique des Particules et en Physique nucléaire à Orsay sont les suivantes :

- sauvegarde des instruments. Au LAL, des expositions d'instruments scientifiques ont eu lieu plusieurs fois à l'occasion de journées portes ouvertes. Certaines pièces sont parfois restées exposées dans des endroits de passage du laboratoire. Un corps de chambre à bulle est exposé de façon permanente à l'extérieur d'un bâtiment du laboratoire. Par contre, ces diverses expositions manquent souvent d'explications minimales utiles pour les non-spécialistes, A l'Institut de Physique nucléaire d'Orsay, un accélérateur de particules a été classé monument historique et est exposé sur le campus. Des visites régulières sont organisées avec projection d'un film qui relate son histoire;

- développement de l'archivage. Un archivage de papiers personnels d'André Lagarrigue, ancien Directeur du Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire est en cours. Une opération d'archivage de documents administratifs, scientifiques et techniques et de photographies est également amorcée à l'IPN d'Orsay. Le problème soulevé ici est de définir le contour de ces archives scientifiques, dont les règles sont presque inexistantes en France.

Dans le secteur de l'astronomie, un groupe d'astronomes s'est réuni à Paris pour considérer les problèmes de sauvegarde du patrimoine. Un large consensus s'est développé autour des points suivants :

- il faut sensibiliser l'opinion des scientifiques français sur les problèmes de sauvegarde du patrimoine;

- la tâche la plus urgente est celle de réunir toute la documentation existante;

- envisager l'établissement d'un inventaire

détaillé du patrimoine (surtout : instruments, archives et documents anciens);

- le CNRS ne devrait pas être sollicité pour des opérations ponctuelles de sauvegarde, mais il devrait mener une politique d'ensemble et sensibiliser les scientifiques sur le sort des archives personnelles des grands savants.

Comme on le constate, la mobilisation reste de l'ordre très patrimonial : il s'agit de sauvegarder et d'exposer. Nous restons persuadés que le manque essentiel correspond d'abord aux limites présentes de l'histoire des sciences qui est réservée à des spécialistes. On dit d'ailleurs que ce sont les scientifiques au bord de la retraite qui s'occupent de l'histoire et des patrimoines, comme si la recherche était un monde en pleine gestation dans lequel la réflexion historique est une perte de temps ! Or, il s'agit bel et bien de réaliser combien les travaux scientifiques sont à l'origine des métamorphoses de la culture et des représentations du monde.

#### **4 - L'HISTOIRE : ENTRE LE PRÉSENT ET LE PASSÉ**

C'est la culture du temps présent qui donne le plus de difficultés - et cela à peu près partout, y compris dans les lieux d'archives. Au besoin, d'une "culture" hyper-contemporaine, éphémère, marginale et marginalisée, comme celle des "tags", on fera volontiers un patrimoine en l'intégrant dans les lieux de mémoire : livres, expositions. Quant au patrimoine de caractère "immobilier", la prétendue "demande sociale" en fait, sinon un parking à culture, au moins un parc de loisirs (voir l'affaire en cours de Chambord, éditorial d'Anne-Marie Lecoq dans *Revue de l'Art*, "Tour une écologie du patrimoine", n° 94, 1991, pp. 5-9), L'historien dépossédé de toute initiative peut légitimement craindre d'être réduit à se faire le chroniqueur, parfois abusé, mais plus souvent désabusé, d'une histoire culturelle contemporaine imposée par les institutions et les bailleurs de fonds.

La fonction sociale de la discipline historique apparaît comme un fait d'évidence, comme un fait d'actualité aussi (l'affaire Tournier), et c'est une fonction qui dépasse largement le social pour toucher au politique, à la chose publique, au patrimoine par conséquent. L'histoire est productrice de connaissances et sur le patrimoine et sur la culture et sur la société. L'historien peut se situer dans une longue distance par rapport à ces trois termes. Mais il peut aussi s'impliquer en vue rapprochée. Qu'on ne dise pas que cela est nouveau : chaque fois qu'une culture, écrite ou orale se développe, l'historien est présent, de près ou de loin, avec des outils intellectuels et l'instrumentation de son temps. Ces outils, cette instrumentation qui permettent de faire l'histoire, de la chronique et de l'épopée au débat de télévision, constituent de plus, à eux seuls, un patrimoine. C'est là qu'est l'enjeu actuel pour la recherche historique au CNRS : "si Ton admet que la culture historique avec son instrumentation spécifique constitue une forme de patrimoine, cette prise de conscience doit amener des thématiques nouvelles.

Faire de l'histoire implique quelques audaces : reconstruire des corpus, réviser les problématiques et les idées historiques reçues comme un fonds de commerce culturel (La Révolution française...), passer du quantitatif au qualitatif et réciproquement, réviser ces notions mêmes... Faire de l'histoire implique aussi et nécessairement une volonté de décloisonner les "cultures" : un traducteur est un historien qui s'ignore, il produit de la connaissance. On ne plaidera jamais assez en faveur des travaux de corpus, catalogues, mais aussi des traductions. L'importance déjà soulignée de cette dernière activité dans le précédent rapport de conjoncture nous dispense d'y revenir plus longuement-

Aujourd'hui, privilège est conféré au plus ancien, au plus lointain, mais aussi au plus proche, au plus actuel. Une zone oubliée ne serait-elle pas l'invention même du savoir-faire historique et de ses instrumentations. Oubliée aussi, la mémoire de la recherche historique telle qu'elle s'est élaborée depuis cent ans, en raison peut-être de l'hypocrite discrédit porté sur le "positivisme" du siècle qui précéda le nôtre. Or, il y a là un excellent terrain d'analyse des

interrelations entre outils de travail, pensée conceptuelle et objets de recherche. Le CNRS ne pourrait-il se préoccuper de trois générations de la recherche qui ont opéré, dans certains domaines, des révolutions capitales dans l'approche des cultures "autres" ? C'est bien en 1907 qu'en France, des médecins psychiatres appellent à la création d'un musée de l'art des aliénés, Quarante ans avant l'art brut et ses nouvelles conventions. Exemple parmi d'autres de l'entrée, dans la notion de patrimoine, de l'étrange, de l'étranger, du marginal, de l'actuel, bref de tout ce qui continue de travailler la conscience de l'historien du culturel Si l'histoire de cette histoire ne se fait pas maintenant au CNRS, quand et où se fera-t-elle ? Continuera-t-on longtemps de faire passer pour nouvelles, dans les sphères culturelles officielles, d'assez vieilles antennes ?

Gardons aussi à l'esprit l'urgence d'une réflexion organisée, libre des contraintes de la "prospective" et des espoirs mercantiles (si c'est possible), sur les nouveaux outils participant à la production, non d'un savoir, mais d'une représentation de la culture et de la société : la télévision, objet de tous les fantasmes, doit devenir un objet à part entière de l'histoire du contemporain.

Le CNRS, par vocation théorique, peut et doit contrebalancer le syndrome de la "commémoration"<sup>11</sup> médiatique pour engager des actions de recherche qui déboucheront sur la mise au jour des outils de la mémoire. Et une telle perspective des recherches historiques sur les sociétés contemporaines rejoignent les préoccupations dominantes de la sociologie de la culture et de l'art.

## 5 - ACTEURS ET CONSOMMATEURS DES POLITIQUES CULTURELLES

L'étude des politiques culturelles - celles de l'Etat et des collectivités locales, et les comparaisons internationales qui ont été menées - et celle des institutions culturelles ont progressé à mesure que s'amplifiait le soutien de l'Etat-Providence. Les enquêtes sur les acteurs des politiques culturelles cen-

traies et locales et sur l'organisation et les règles d'action et de décision, de la bureaucratie culturelle décrivent les mécanismes de l'intervention publique, et permettent d'apprécier la rationalité et les finalités de celle-ci. Un mouvement important d'analyse de l'histoire et du fonctionnement des organisations artistiques, et notamment des musées, permet de tisser un lien entre la politique culturelle et ses réalisations monumentales les plus symboliques,

Les travaux sur les systèmes de professionnalisation artistique, sur les marchés des biens d'art et de travail artistique et culturel, sur la démographie professionnelle des populations d'artistes et les transformations de la division du travail artistique ont connu depuis une dizaine d'années un développement rapide et cumulatif.

Les recherches sur la consommation artistique et culturelle appartiennent au répertoire désormais classique des instruments de la connaissance sociologique. Les enquêtes périodiques du Ministère de la Culture sur les pratiques culturelles des Français, et, à intervalle beaucoup plus large, de l'INSEE sur les loisirs, et les multiples sondages pratiqués par les instituts privés mesurent révolution des comportements. L'étude des comportements de lecture, celle de la fréquentation des musées et des concerts prennent en compte ces dimensions nouvelles de la perception esthétique, et de ses conditions sociales et culturelles, en empruntant autant à la sociologie ou à la psychologie cognitive qu'à la sémiologie et à l'esthétique.

On sait que la culture est une affaire de marchandise, et la notion de patrimoine se prête d'autant mieux à conforter une telle identité de fait. Pour la science économique, au moins dans ces courants dominants, le terme de patrimoine correspond à la notion d'actif net (solde d'avoirs et de dettes). Il est proche de celui de capital. Ce sens donné à une telle notion, ne peut éventuellement concerner la science économique que de manière indirecte, puisqu'il affecte les préférences des agents et, à travers celles-ci, la valeur marchande des biens (ou, plus généralement leur valeur monétaire). Dans ces conditions, il est possible de trai-

ter tout élément de patrimoine culture! (un tableau, par exemple) comme une forme parmi d'autres de bien; et, au premier chef, d'étudier les phénomènes marchands affectant certains éléments de patrimoine, tels que, par exemple, les bulles spéculatives affectant la valeur marchande de certaines œuvres d'art. Par contre, pour des courants minoritaires qui s'intéressent à "l'encastrement" de l'économie dans des sociétés diversifiées, il peut être pertinent de s'intéresser explicitement à des questions de sens. Ainsi les conventions par lesquelles chaque société catégorise les biens économiques peuvent être considérées comme une organisation du sens faisant partie du patrimoine de la dite société. De même, en considérant la manière dont le patrimoine symbolique constitue la représentation du "rang social" dans une culture déterminée, on peut éclaircir des phénomènes économiques tels que les différences d'appréhension du chômage.

La science économique, en matière de patrimoine, peut donc permettre de compléter les analyses tant sur les phénomènes marchands de la culture que sur le fonctionnement des représentations institutionnelles de la culture. Ce qui montre, une fois de plus, que la notion de patrimoine, quand on la traite comme l'objet polymorphe des investigations transdisciplinaires, n'a plus de commune mesure avec une quelconque obsession de la conservation. En quelques années, cette notion est donc devenue le point nodal de l'interrogation sur les métamorphoses de la culture (et de la société), alors qu'elle n'était qu'une injonction collective à la conservation.

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Les propositions les plus évidentes sont toujours de l'ordre d'une "aide à la conservation". Il s'agit alors de trouver des moyens et des lieux de sauvegarde pour des archives, des instruments ou d'autres objets. Les recherches scientifiques ont éga-



lement besoin de développer des banques de données et de les rendre le plus adaptable possible aux demandes des chercheurs. Mais, nous venons de le montrer dans ce rapport, les relations entre patrimoine, culture et société entraînent d'abord la nécessité d'une véritable transdisciplinarité qui est tout le contraire de l'adage "à chacun son patrimoine" ! De plus, à la notion classique de patrimoine comme bien culturel hérité - ou que Ton se dispose à transmettre - se substitue une autre notion, qui tendrait à instituer comme patrimoine toute forme culturelle en danger de s'évanouir ou de se transformer. De la même manière que l'on parle "d'histoire immédiate", on pourrait alors parler de "musée immédiat" et de "patrimoine immédiat". C'est là une nouvelle question pour notre futur, celle de notre contemporanéité immédiate comme champ d'investigation scientifique.

## 1 - L'ARCHIVAGE DES DOCUMENTS DE RECHERCHE

L'archivage devrait se faire selon une perspective interdisciplinaire. Il faudrait alors une équipe centrale qui regroupe des membres de tous les secteurs scientifiques du CNRS et qui pourrait développer une politique de conservation à long terme. Cette mission serait nécessaire à la fois pour impulser les possibilités de l'archivage et pour discuter des finalités d'une telle conservation.

- Il est essentiel de mettre l'accent sur l'histoire des savoir-faire des disciplines, ce qui implique d'abord de collationner les archives de la recherche, de les préserver, de les mettre à disposition.

- L'outillage scientifique et technique est un patrimoine reconnu comme tel par une institution nationale qui le prend déjà en charge, quoique lacunairement et insuffisamment : l'Inventaire général des monuments et richesses artistiques de la France. Nom trompeur : c'est bien de l'ensemble d'une culture matérielle que s'occupe l'Inventaire, et pas seulement de l'élite des objets que semble à tort recouvrir l'expression "artistique". Une première

conséquence pratique de ces réflexions devrait être la suivante ; que le CNRS donne aux chercheurs des sciences dites "dures" les moyens institutionnels d'agir comme experts auprès de la commission *ad hoc* de l'Inventaire,

- Il faudrait développer les photothèques, les vidéothèques et les magnétothèques. Les historiens de l'art sont particulièrement attentifs aux lacunes catastrophiques de l'organisation de ces domaines en France. Ils y réfléchissent depuis longtemps et ont une longue expérience des suppliques aux pouvoirs publics dans ce domaine. À un moment où les choses évoluent - création de la GBF, regroupement d'une "bibliothèque des arts" rue de Richelieu, réorganisation de l'INA etc. -, il n'est que plus urgent de rappeler la vocation du CNRS à être présent sur ces chantiers, car le problème concerne non seulement les historiens mais tous les secteurs de recherche. Il ne s'agit pas de tout conserver au CNRS, Les équipes n'ont ni la place ni le personnel pour gérer les fonds. Il s'agit de lancer un programme diversifié de collaboration avec les institutions existantes ou à venir

- Il serait intéressant d'organiser les archives d'institution de façon à pouvoir retracer le "futur antérieur" de la vie de laboratoire, les procédures de décision scientifique et les méthodes de travail en général.

## 2 - LES MISSIONS D'EXPERTISE EN MATIÈRE DE PATRIMOINE ET DE CULTURE

Les modalités de coopération entre les chercheurs et les institutions demeurent complexes. La présence des experts n'est pas qu'une "garantie scientifique", elle devrait être la preuve de la participation constante de la recherche à la transmission culturelle.

Dans bien des opérations culturelles (expositions, musées, fouilles...), les chercheurs du CNRS

sont conviés à donner leur avis, et ils travaillent réellement avec les institutions concernées. Mais l'exigence de vulgarisation finit par jouer au détriment de la rigueur scientifique. Mais ce qui nous semble plus grave encore, c'est l'usage légitimant de la recherche scientifique clans de telles opérations culturelles. Cette fonction de légitimité place le chercheur dans une situation fausse, contre laquelle il ne peut rien, puisque ses revendications seront taxées de "moralisme scientifique".

serait donc nécessaire que le rôle de l'expert soit mieux défini afin de permettre aux exigences de la recherche scientifique d'éviter l'assujettissement à une culture "universelle" du type "*Disney-world*". Les problèmes soulevés par la vulgarisation sont de plus en plus cruciaux, et une certaine "charte" du mode des interventions serait la bienvenue.

### 3 - LA DYNAMIQUE INTERNATIONALE

En matière de développement international, on constate que le syncrétisme culturel et ses tendances à l'universalisation remettent en cause le phénomène de domination culturelle. Il ne s'agit pas de dresser contre lui le rempart des identités culturelles ni de rechercher à tout prix une authenticité perdue, mais de comprendre que le pluralisme des cultures renaît du syncrétisme lui-même. Perspective difficile à admettre, il est vrai. La "défense patrimoniale" risque de trahir trop souvent l'idéologie d'une conservation des origines et de masquer alors la violence nécessaire de la confrontation des cultures.

Dans le domaine de l'archéologie, un siècle et demi de recherches de plus en plus exhaustives et minutieuses, menées dans tout le bassin méditerranéen, a abouti à une vision cohérente d'un monde complexe, rétabli jusqu'en sa plus lointaine préhistoire au cœur des échanges et influences intervenus dès les époques les plus reculées entre Orient et Occident. La part de la France dans cette résurrection est considérable, non seulement par les grandes missions et les multiples chantiers ou-

verts au XIX<sup>e</sup> siècle et au début du nôtre, mais aussi par les institutions créées dans les différents pays, de l'Espagne et du Maroc à la Perse : écoles françaises d'archéologie, instituts, services des antiquités, musées... qui ont concouru au rayonnement de notre culture, et aussi, à la mise en place et à la formation des différentes archéologies nationales.

Dans le domaine des langues, la recherche désignée comme "linguistique de terrain" devrait être renforcée et faire l'objet d'une planification, afin d'accélérer l'étude et la description non seulement de nombreuses langues "minoritaires", dont on prévoit la disparition à court terme, mais aussi d'autres peu ou pas encore décrites. L'urgence de cette étude est accrue par les récents bouleversements socio-politiques intervenus sur tous les continents qui correspondent aux zones géographiques de ce type de recherche et par l'urbanisation qui a favorisé des situations de diglossie. Une planification de la recherche de terrain, dans le souci d'une complémentarité thématique et géographique, permettrait de couvrir, en outre, de nombreuses zones géographiques qui n'ont pas été - ou ont été peu - étudiées par la recherche française (Australie, par exemple, ou Afrique d'expression portugaise). Il faudrait, enfin, valoriser d'une manière optimale l'incomparable richesse des matériaux linguistiques (enregistrements sonores ou écrits) accumulés jusqu'ici dans diverses unités de recherche et non suffisamment exploités.

L'inclusion des recherches sur l'art et la culture dans des programmes de coopération internationale associant le CNRS à ses homologues institutionnels doit être favorisée. Il semble, en particulier, important d'ouvrir ou de consolider la politique de coopération vers l'Europe de l'Est où existe une tradition établie et féconde de recherche sur les arts, en anthropologie et en psychologie plus qu'en sociologie. La sociologie de la culture s'était constituée clans les années 1955-1965 autour des recherches sur la consommation et les pratiques culturelles, sur le développement culturel local, sur les instances de socialisation et leur contribution à

la reproduction du système social, et autour de travaux plus interdisciplinaires sur les média et la communication. De cette phase particulière sont issus une théorie sociologique de la production et de la consommation des biens culturels savants qui a fait largement école, et un ensemble de recherches sociologiques, ethnologiques et anthropologiques sur les cultures populaires, celles des communautés locales, urbaines et rurales, des minorités ethniques et religieuses, de la classe ouvrière. Depuis lors, la sociologie s'est plutôt attachée à approfondir le débat théorique sur les rapports entre culture savante et culture populaire, à la lumière des travaux des ethnologues et des historiens, qui contribuent pour une part croissante à la recherche empirique et archivistique sur ce terrain. La sociologie de l'art s'est surtout développée depuis le milieu des années 1970; moins spéculative que la sociologie de l'art allemande, moins liée à l'héritage marxiste qui continue d'inspirer largement la sociologie de l'art britannique, la discipline doit son essor, en France comme aux Etats-Unis, à l'adoption des méthodes et instruments d'enquête et des outils conceptuels d'autres sociologies - celles des organisations, du travail, des professions et de l'éducation, des politiques publiques - et à une forte demande de connaissance sur les principaux secteurs d'intervention culturelle des pouvoirs publics. Aux liens établis avec l'histoire et l'histoire sociale des arts, il faut aujourd'hui ajouter les échanges et confrontations de la sociologie avec l'économie de la culture, discipline de constitution récente et dont les contributions les plus originales et les plus durables viennent et viendront, comme en sociologie, de l'application d'analyses et de modèles qui ont cours dans les domaines les plus centraux de la science économique.

On pourrait citer d'autres exemples de cette dynamique internationale, mais l'essentiel est surtout de décloisonner la recherche pour permettre d'articuler une "épistémologie des cultures" aux formes mêmes du développement culturel.

## 4 - LA CULTURE D'ENTREPRISE DUCNRS

Il serait nécessaire que le CNRS développe les images de sa propre culture à partir de cette transdisciplinarité. L'image de l'entreprise peut apparaître comme une mosaïque composée par les investigations menées dans chaque secteur. De ce point de vue, elle peut sembler réussie publiquement, mais l'idée d'une culture d'entreprise suppose un jeu d'interférences beaucoup plus déterminé entre les secteurs de recherche. Il s'agit alors de promouvoir cet effort de transdisciplinarité comme image dominante de la culture d'entreprise. La constellation des laboratoires, au lieu de subir les effets de restriction à cause d'une politique de développement de "grands" laboratoires, pourrait fort bien se trouver plus unie par une dynamique de la culture d'entreprise.

D'autre part, il faut considérer que l'idée même de culture d'entreprise a une incidence immédiate sur l'ensemble des phénomènes culturels d'une société. Elle n'est donc pas réductible au seul fait de l'optimisation de l'image de marque, elle introduit elle-même une dynamique créatrice de culture. Donc il ne s'agit pas de circonscrire une culture d'entreprise CNRS à une politique patrimoniale unique et globalisante, mais de forger celle-ci comme principe créateur de culture. Publiquement, il ne semble pas convaincant de penser que le CNRS soit un lieu d'innovation culturelle au même titre qu'un grand musée ou qu'un grand théâtre. Et pourtant, quand on songe que le devenir même de la culture se joue dans une telle entreprise, on comprend mal cette absence de visibilité de la création culturelle. Ce qui prouve, une fois de plus, que l'idée publique de culture reste dominée par les patrimoines au détriment de l'actualité même de la recherche.

**Henri-Pierre Jeudy**  
*Président du groupe 21*



# 22

## LES OUTILS DE LA RECHERCHE : MODELISATION, SIMULATION, MOYENS INFORMATIQUES

'Mon Dieu, délivrez-moi du modèle"  
*Diderot, Essai sur la peinture*

### DIVERSITE DES DOMAINES, DIVERSITÉ DES REPRÉSENTATIONS

#### 1 - LES MODÈLES DANS LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

La modélisation et la simulation sont aujourd'hui reconnues comme des instruments indispensables pour approfondir nos connaissances dans la majorité des disciplines; elles mobilisent toutes deux des moyens informatiques importants. Le fait que plus des trois-quarts des sections du CNRS aient participé à la réflexion sur ce thème témoigne de l'intérêt général qu'il suscite. Mais la présence même d'un si grand nombre de disciplines conduit

inévitablement à une extraordinaire diversité d'attitudes, de tendances et de perspectives. Chaque discipline a ses "modélisateurs" qui se comprennent souvent difficilement entre eux; même pour la statistique, que tous utilisent, l'incompréhension est presque totale entre un physicien, un biologiste et un sociologue, car les mêmes mots n'ont pas toujours le même sens. Aussi est-il particulièrement nécessaire de préciser le sens que nous donnerons dans ce texte aux termes de "modélisation" et de "simulation".

La majorité des chercheurs s'accorde pour reconnaître que toute "**démarche scientifique**" s'appuie, une fois que les concepts de base d'une discipline ont été élaborés, sur un va-et-vient entre le monde réel et le ou les modèles proposés pour analyser une structure. L'épistémologie étudie le processus par lequel la modélisation permet de formuler, de maîtriser et de suivre l'évolution d'un système, pour en faire une démarche scientifique rigoureuse. Cette étude entre tout naturellement dans la théorie de la connaissance.

la "**modélisation**" apparaît souvent comme la formalisation d'une situation réelle. Un modèle est une représentation simplifiée, donc s'éloignant

plus ou moins de la réalité, ce qui donne au modèle une autonomie par rapport à celle-ci. Les modèles les plus opérationnels font généralement appel à un formalisme mathématique, mais il existe d'autres formalismes. Ils peuvent être quantitatifs ou qualitatifs. Un modèle fait apparaître des relations entre les variables structurant le champ d'une discipline : par exemple, une équation aux dérivées partielles peut relier certaines fonctions des coordonnées d'une particule au cours du temps. Parmi les coefficients ou paramètres reliant ces variables, certains font partie intégrante du modèle et peuvent ne pas relever d'un ajustement à des données expérimentales (comme la vitesse de la lumière dans le modèle de la relativité restreinte), d'autres doivent au contraire être *a priori* estimés ou identifiés expérimentalement.

La modélisation est la condition de la **simulation**. Certaines équations régissant l'évolution d'un modèle n'ont pas de solution(s) connue(s) : la simulation numérique est la seule voie possible pour obtenir une idée du comportement du système étudié. C'est là le sens du terme "simulation" dans le domaine des sciences exactes. Dans les autres sciences, le mot est pris dans une acception un peu différente : la simulation fournit des solutions potentiellement réalisables du modèle, ceci souvent dans un environnement aléatoire; ces résultats permettent de construire des scénarios, et fournissent un "échantillonnage" de situations possibles.

## 2 - LA PLACE DES MODÈLES DANS LES DIFFÉRENTS DOMAINES D'APPLICATION

De prime abord, le seul point d'accord entre tous les chercheurs faisant de la modélisation concerne les enjeux : la modélisation et la simulation apparaissent aujourd'hui indispensables pour le progrès des connaissances; de plus, leur coût est souvent moindre que celui d'un, nombre important d'expériences. Tous sont unanimes : dans ce domaine, comme dans bien d'autres, la France connaît

un certain retard, essentiellement par manque de moyens humains et matériels; sans un investissement important tant intellectuel que matériel, peu de progrès sera possible. Mais au-delà de ce consensus, il est nécessaire de bien préciser ce que recouvrent ces mots dans des disciplines différentes,

Les disciplines peuvent être réparties en deux groupes : celles qui utilisent les modèles comme des outils, celles pour qui les modèles sont aussi objets d'étude,

Les premières couvrent trois domaines des sciences :

- les sciences de **la matière**, "ni vivante, ni pensante";
- les sciences de **la vie**, "non pensante";
- les sciences de **l'homme**.

Dans ces trois domaines, à côté des scientifiques proprement dits, les ingénieurs ont une autre exigence : disposer de modèles immédiatement opérationnels.

Ces sciences utilisent essentiellement des modèles à fort contenu mathématique. Mais des modèles comme certains modèles linguistiques entretiennent des liens particuliers avec la logique.

Pour la **mathématique**, la **logique** et, à un moindre degré, les **langages informatiques**, les modèles sont donc aussi objets de construction et d'étude.

Cette distinction met en évidence une unité de conception à l'intérieur de chaque domaine. Mais cette homogénéité ne doit pas masquer un phénomène essentiel : le **transfert** de connaissances ou de modes de raisonnement d'une discipline vers une autre que rend possible la modélisation. Il faut cependant prendre garde que des modèles ayant déjà fait leurs preuves dans d'autres disciplines se révèlent quelquefois rebelles à cette transposition.

L'analyse critique de cette inadaptation, quand elle est faite, peut avoir un effet positif - la recherche d'outils de modélisation mieux adaptés -, mais aussi un effet négatif - pousser au rejet de toute modélisation.

Enfin, le "fonds mathématique" utilisé varie énormément d'un domaine à l'autre (avec, bien sûr, des zones de recouvrement) :

- dans les sciences de la matière et dans un très grand nombre d'applications technologiques, l'aspect quantitatif domine dans la mesure où la formalisation y est la règle : les modèles sous-jacents sont relativement bien identifiés, même s'ils ne sont qu'approchés et peuvent être l'objet d'un traitement numérique. Les sciences exactes ont presque toujours trouvé les outils mathématiques adaptés à une modélisation efficace dans la panoplie des mathématiques existantes, mais ont aussi quelquefois considérablement stimulé leur développement;

- dans les sciences de la vie et *a fortiori* dans les sciences de l'homme, le recours à la formalisation est moins systématique, et l'outil mathématique moins omniprésent, ce qui peut signifier que la mathématique pertinente n'est pas encore disponible.

## LES ENJEUX

- Dans les **sciences exactes** et dans les **sciences technologiques**, modélisation *et* simulation. Font appel à des moyens de résolution numérique importants, réalisables grâce à l'évolution de la technologie informatique et à l'augmentation rapide de la puissance de calcul des ordinateurs : on peut envisager de traiter des problèmes physiques de plus en plus complexes. La simulation numérique est devenue une technique de base dans l'analyse, la conception et le dimensionnement des systèmes de plus en plus complexes, sans vérification expérimentale des solutions retenues. Des gains de temps et de productivité ont été réalisés

dans les domaines les plus variés ; aéronautique, espace, nucléaire, automobile, production et conversion de l'énergie, exploitation du pétrole, "procédés". Il en résulte une diminution notable des durées de conception d'un projet et de son développement. Ainsi, dans le domaine de **l'aérodynamique** et de **la combustion**, de nombreuses études expérimentales sur maquette ont été remplacées par des simulations numériques : elles ont ouvert des voies nouvelles pour comprendre des phénomènes, améliorer des méthodes de conception et optimiser des systèmes et des procédés.

Toute **approche expérimentale** nécessite des installations, des équipements, une multiplication d'essais avec des précisions et des qualités de mesure : les coûts sont élevés et le temps, pour obtenir des résultats, souvent prohibitif; la tendance naturelle est donc, dans le contexte actuel, de faire le moins d'expériences possible. Nous retrouvons ici un débat fondamental dont nous reparlerons ultérieurement et qui a une dimension épistémologique : la place de l'expérimentation, ou plus généralement la validation des résultats de l'ensemble "modélisation-calcul numérique" par sa confrontation avec le monde réel. Notons toutefois que la simulation ne saurait remplacer routes les études expérimentales, en particulier lorsque les phénomènes sont imparfaitement représentés par des modèles physiques ; écoulements turbulents, interaction turbulence \* cinétique, présence de phases dispersées, milieux hors d'équilibre, etc.

**L'approche théorique**, basée sur la modélisation, conduit à des résultats généraux qui permettent une meilleure compréhension des mécanismes physiques en jeu. Elle n'est souvent applicable que dans un univers "idéal", volontairement simplifié; ainsi, très souvent les seuls modèles dont on connaisse une solution théorique concernent les problèmes linéaires. Mais, dans tous les domaines, amélioration des modèles et amélioration des théories sont intimement liées. D'autre part, il ne faut pas oublier que "finesse des modèles" et capacités de calcul sont liées de manière intrinsèque. Il s'ensuit aussi qu'un modèle valable à un niveau de description particulier peut n'avoir aucun intérêt



- voire être inapplicable - à un niveau différent, et cela quelle que soit la discipline. Ainsi, les économistes qui veulent relier des résultats de micro-économie à ceux de macro-économie connaissent bien cette difficulté.

La "**modélisation moléculaire**" est sans doute le meilleur exemple de cette interdépendance entre finesse des modèles et puissance de calcul. D'un côté, il est possible, sur des bases de mécanique quantique et de physique théorique, de décrire une molécule avec beaucoup de finesse; d'un autre côté, la même démarche descriptive est inapplicable à un phénomène macroscopique dans la mesure où la simulation d'un tel phénomène, par exemple le simple calcul de la température de fusion de l'eau, phénomène qui met en jeu un très grand nombre d'éléments avec chacun plusieurs degrés de liberté, prendrait un temps supérieur à l'âge de l'univers.

Les compétences actuelles des biologistes moléculaires ne les mettent pas à même de s'intéresser à des questions relatives à une problématique globale de l'environnement, leurs Techniques ne permettant que des apports ponctuels à cette problématique.

**L'outil numérique** permet la description de problèmes physiques beaucoup plus complexes, il s'attaque à des problèmes non linéaires et il permet d'aller quelquefois au-delà du simple outil mathématique qu'il utilise. La non-linéarité de certaines relations permet de mieux préciser le comportement d'une réponse par rapport à l'effet d'une variable causale et, par là même, d'introduire des comportements "inattendus" : une réponse non proportionnelle d'une variable climatique à un effet introduit facilement la possibilité de transitions brutales.

Le calcul Fournit une quantité considérable d'informations, en particulier sur l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques principales; ce qui d'ailleurs pose le problème connexe de l'exploitation exhaustive et correcte de toutes ces informations (l'accident de la navette spatiale américaine

Challenger est partiellement dû à une mauvaise exploitation de données antérieures au vol tragique). Surtout, le calcul permet d'accéder à des quantités non encore mesurables expérimentalement; il permet de calculer rapidement les conséquences d'une évolution que l'on a pu modéliser. Naturellement, en plus de la question fondamentale de la fiabilité du modèle, il existe aussi des questions techniques non résolues; celles concernant la précision, la stabilité et la convergence des algorithmes de calcul sont les plus importantes. Celles des coûts de calcul, d'un ordre différent, sont liées aux performances actuelles des ordinateurs.

Le premier enjeu est donc "**économique**" : diminution des temps pour mettre au point un projet, diminution des coûts expérimentaux, meilleure évaluation des conséquences.

- Au-delà de cet enjeu, il en existe un autre, non moins fondamental du point de vue scientifique : toute modélisation, en tant que tentative de formalisation, est une avancée vers une approche conceptuelle, donc théorique. Certains, dans des domaines scientifiques particuliers, peuvent nier l'intérêt d'une approche essentiellement théorique; mais ils ne peuvent pas nier que la modélisation puisse révéler les faiblesses d'une construction conceptuelle et inciter ainsi les scientifiques à un nouvel effort de réflexion formel; le cas des sciences humaines est, à cet égard, assez exemplaire,

La formalisation, avec ou sans équations mathématiques, contraint celui qui l'emploie à expliciter les suppositions sur lesquelles il bâtit son modèle, à préciser les hypothèses (au sens statistique du terme) à analyser. Elle est le support intellectuel de toute construction rigoureuse de concepts. C'est un instrument indispensable pour élaborer un travail scientifique de qualité. Certes, le réel peut - et souvent doit - guider la formalisation, mais la seule observation du réel ne suffit pas à élaborer des connaissances; si tel était le cas, la recherche se limiterait bien souvent à l'exploration animale d'un territoire et la production scientifique ne pourrait qu'en pâtir.

Le transfert des connaissances d'une discipline à l'autre entraîne une confrontation entre disciplines, qui joue aussi un rôle incitatif. La modélisation reste efficace même lorsque la démarche ne va pas jusqu'à la production d'un modèle, car les étapes préliminaires suffisent à obtenir cette confrontation et à jouer un rôle de "stimulant intellectuel".

Il y a plus : la modélisation est souvent la seule approche possible, par exemple quand il s'agit de prédire ce que sera demain : notre climat, notre environnement, notre milieu socio-économique.

Le second enjeu est donc celui "d'un **approfondissement** et d'une **stimulation** de la connaissance scientifique" : la modélisation est un **outil intellectuel**, permettant de mieux scruter le réel,

- Toute modélisation doit nécessairement s'appuyer sur des données. L'accès aux données, même celles que l'on consulte sans pour autant les avoir créées soi-même, est aussi un élément capital pour une recherche de pointe; il entre dans le cadre plus général de l'accès aux informations les plus pertinentes et à leur traitement. L'accès à des séquences génétiques, tant protéiques que génomiques, en est un exemple caractéristique puisque c'est un des rares domaines où l'ensemble d'une communauté scientifique partage un même jeu de données.

La constitution de **banques de données** est absolument nécessaire pour toute avancée scientifique. Elle implique un travail de compilation, souvent méprisé au sein de notre communauté scientifique : rares sont les travaux de ce type qui peuvent être "reconnus" et il est déconseillé aux jeunes chercheurs de s'y lancer. Il en va de même pour toutes les études de **systématique** dans les sciences de la vie qui, d'une certaine manière, contribuent à l'accumulation de connaissances utiles. Bien qu'elle soit en partie renouvelée par l'apport de la biologie moléculaire, la systématique est souvent considérée comme une discipline archaïque, vouée à la disparition. Mais qu'advientra-

t-il quand on saura analyser une bactérie pour créer une symbiose avec une plante cultivée, sans que personne ne sache identifier cette plante ? Quant aux sciences humaines, un obstacle fréquent au développement des banques de données semble venir de ce que les communautés savantes ne s'accordent guère sur le choix des données qu'il convient de prendre en compte, faute de théories bien établies dans les domaines visés.

Tandis qu'à l'étranger les travaux de systématique sont poursuivis ou même repris, en France, ils avaient tendance à disparaître de la scène scientifique. Souvent, comme dans le domaine pharmacologique, quand ces recherches peuvent devenir lucratives, l'activité est entièrement abandonnée à des sociétés privées. Mais les choses ont changé à cause des interactions enfin reconnues entre systématique, évolution, phylogénie (y compris moléculaire), taxinomie biochimique : la biosystématique connaît un renouveau certain.

Le seul moyen de minimiser les conséquences de cette attitude serait que les chercheurs aient la possibilité de peser sur le choix des informations qui, du fait de leur intérêt scientifique, doivent, être introduites dans les banques de données.

Le troisième enjeu est donc celui de "**l'accès à l'information**", par le biais des banques de données : la politique scientifique française devrait être plus pugnace en exprimant clairement sa volonté, au moins dans la définition des règles du jeu.

## L'EVOLUTION ET LES TENDANCES

- La séparation des trois entités - modélisation, simulation et informatique - ne correspond pas à la réalité : elles sont en fait fortement imbriquées. Il existe d'ailleurs un danger bien réel de ne pas attribuer à chacune d'elles sa fonction véritable. Par

exemple, l'échec d'une modélisation n'est pas toujours dû à la mauvaise formulation d'une relation théorique : des résultats expérimentaux obtenus dans un domaine insuffisamment exploré associés à un algorithme de calcul défaillant peuvent en être les seuls responsables.

Dans les sciences de la vie et de l'homme, l'affaiblissement du niveau général de compréhension tant du point de vue formel (mathématique et logique) que conceptuel est alarmant : l'esprit critique de certains chercheurs est souvent très émoussé. Nombre d'entre eux ont pris l'habitude d'utiliser de façon purement mécanique des résultats "sortis" d'un ordinateur; à preuve, par exemple, la pauvreté des résultats extraits du dépouillement d'une enquête bien faite, ou encore l'utilisation automatique de résultats de mesures de laboratoire, comme la valeur d'un dosage, sans se préoccuper de ce qu'elles ne sont pas indépendantes de l'algorithme numérique utilisé pour les obtenir. A cela s'ajoute le fait que l'appareil mesureur et l'ordinateur font partie du même instrument, qui est couvert par le secret industriel : le chercheur est donc contraint de faire une confiance aveugle à l'industriel. Or si la confiance est acceptable lorsqu'il s'agit d'une question technologique, elle l'est beaucoup moins pour une question scientifique comme celle du choix d'un algorithme de minimisation.

L'outil informatique est bien souvent dominateur; il risque de faire disparaître la réflexion conceptuelle en masquant l'existence d'un modèle sous-jacent. Malgré ce risque, son emploi est un élément incontournable dans toute activité de modélisation.

- Les développements en moyens informatiques ont été spectaculaires et les progrès continuent à être appréciables. La puissance de calcul des **grosses machines** n'a cessé de croître. Mais la technologie n'est pas seule responsable de cette évolution, la notion de "pipeline" (apparue dans la décennie 1970/1980) a permis d'utiliser de manière optimale les différents étages d'une unité fonctionnelle : un nouveau calcul est commencé avant que le précédent ne soit terminé. L'apparition de super-

calculateurs vectoriels, comme le Cray, en est une conséquence : un calcul peut maintenant se faire à une vitesse atteignant la fraction de Gigaflop (= milliard d'opérations par seconde).

La baisse du prix des unités fonctionnelles conduit maintenant à envisager leur multiplication, ce qui permet d'effectuer simultanément, en parallèle, des opérations indépendantes d'un même calcul. Cela peut se faire sur une échelle réduite de parallélisme fonctionnel entre unités de calcul jouant des rôles différents, ce qui a conduit à la réalisation de microprocesseurs superscalaires de hautes performances. On répartit également les microprocesseurs aux nœuds d'un réseau de communication pour leur permettre d'échanger les informations nécessaires à la synchronisation des calculs. Ce parallélisme peut être massif : il atteint actuellement, dans certains machines, plusieurs dizaines de milliers de processeurs.

Le parallélisme pose en fait de nombreux problèmes qui ne sont pas encore résolus. Les échanges de données peuvent charger de façon importante un réseau de communication, dont l'architecture devient un élément crucial de la qualité de la réponse. La programmation est délicate : les performances sont extrêmement sensibles à la répartition des tâches entre processeurs, et il n'existe pas encore de bons algorithmes effectuant automatiquement le découpage permettant cette répartition. Enfin, un certain nombre d'algorithmes classiques, mis au point pour des machines non parallèles, ne sont pas du tout adaptés à cette nouvelle architecture.

Dans l'actuelle décennie, on devrait résoudre ce problème : de réalisations actuelles atteignant une trentaine de Gigaflops, les projets en cours de développement devraient atteindre le Teraflop (= 1000 Gigaflops)

Mais, à côté de cette montée en puissance des super-ordinateurs, les petites machines du type **micro-ordinateur** (les ordinateurs personnels) ou les **stations de travail** sont apparues : elles atteignent des performances remarquables qui les ren-



dent indispensables à tout laboratoire. Nous devons noter que l'ouverture à l'informatique, pour de très nombreuses disciplines, n'a pu se faire que parce que les micro-ordinateurs ont été introduits de façon massive dans les laboratoires. Ce rôle initiateur, puis formateur, ne doit donc pas être oublié, y compris parce qu'il a pu servir à introduire des possibilités de modélisation pour des disciplines qui en étaient éloignées.

Une autre caractéristique de l'évolution a été le développement des **réseaux**. L'interconnexion qu'ils permettent est d'une utilité unanimement reconnue, que ce soit pour l'échange de messages, pour le transfert ou l'accès à de très gros fichiers (données expérimentales ou bases documentaires), pour la soumission de travaux à des machines mieux adaptées, en règle générale de grosses machines délocalisées. Cette interconnexion s'effectue aussi bien à courte distance (sur le réseau local d'un laboratoire) qu'au niveau international.

Mais si l'interconnexion est devenue une nécessité, elle se fait avec les équipements les plus variés, certains étant chers et inefficaces. Si les réseaux locaux, au niveau d'un laboratoire, ne soulèvent pas de problèmes trop importants il n'en est déjà plus de même sur un campus : les standards des premiers (*ethernet* ou *token ring*) ne sont pas étendus aux seconds. L'échange de données par l'intermédiaire de passerelles est alors plus compliqué. Le couplage au réseau international est beaucoup plus délicat : les solutions nationales, certes originales, ne permettent pas un passage facile. Mais il s'agit essentiellement de problèmes politiques et d'existence de monopoles : la création de réseaux au sein de disciplines et de passerelles permettent de travailler.

Enfin, il ne faut pas négliger le coût souvent important du **transfert des informations**. Ainsi, le transfert d'images brutes, d'un ordinateur où elle est recueillie sur un autre où elle doit être traitée, peut être beaucoup plus coûteux que le traitement.

D'une manière générale, la plupart du temps **le matériel apparaît en avance sur le logiciel**; ce

qui, venant s'ajouter à une utilisation qui est loin d'être optimale des possibilités, crée une sensation assez répandue de sous-exploitation des capacités actuelles des outils informatiques. La demande de personnels informaticiens compétents est une constante dans les souhaits des laboratoires. Mais le souhait d'une utilisation optimale est probablement un faux problème : la situation évolue si rapidement que le nombre de spécialistes risque d'être toujours insuffisant. La qualité du matériel est très importante, et la faiblesse de l'industrie française est unanimement regrettée. La faiblesse des logiciels est attestée par la majorité des utilisateurs, aussi bien par les compétents (qui jugent certains compilateurs de très grosses machines franchement mauvais) que par les occasionnels (qui se plaignent amèrement du manque de "convivialité" des logiciels).

- La nécessité d'un large accès aux données, dont nous avons indiqué l'extrême importance, engendre de nouvelles craintes : le risque de **piratage** de données importantes. A côté du vol, existe la crainte complémentaire de la maladie : la propagation des **virus informatiques** est grandement facilitée par l'existence des réseaux. La question de la **sécurité informatique** n'est pas encore résolue de façon satisfaisante. Il s'agit davantage d'une question d'information permanente et actualisée auprès des chercheurs que d'une question technique. Des règles simples doivent être impérativement édictées, diffusées et suivies; il faut en outre sanctionner les négligences qui peuvent provoquer la paralysie de tout un centre.

- L'évolution ne peut pas être la même en physique théorique, où le premier champ d'application en France de la méthodologie "modélisation + simulation massive" date de la fin des années 1960, et dans les sciences sociales où la formalisation est bien souvent illusoire. Mais elle va de façon, assez générale **vers une accumulation de "faits"**, de données provenant ou non d'expériences. La foi, un peu naïve, que l'"informatique" apportera bien une solution conforte les présomptions de ceux qui décèlent, dans notre évolution scientifique, un manque général de réflexion.

# LA SITUATION

## 1 - LE MATÉRIEL

Les **micro-ordinateurs** sont l'outil indispensable du chercheur, nous englobons dans cette catégorie aussi bien les ordinateurs personnels que les cartes comportant un microprocesseur. Ils sont utilisés dans les domaines suivants :

- traitement de textes : tous les articles, ouvrages et textes sont maintenant préparés de cette façon, souvent par le chercheur lui-même;

- édition de fichiers, préparation et tests de programmes, calculs de taille limitée, dépouillement de résultats; .

- acquisition de données expérimentales;

- point d'entrée sur les réseaux de communication.

L'apparition et la multiplication rapide de ces matériels a néanmoins fait apparaître un certain nombre de problèmes qu'il est nécessaire de traiter sérieusement. Le coût du matériel n'est qu'une composante du prix total, souvent bien inférieur à celui du logiciel : de nombreux laboratoires souffrent d'un sérieux sous-équipement en logiciel.

Bien que leur emploi soit "facile", la maintenance des systèmes d'exploitation souvent complexes rend nécessaire la présence d'un personnel qualifié dans ce domaine. Il est navrant de constater que nombre de chercheurs sont forcés de délaisser leur propre travail pour assurer eux-mêmes (et sans être les plus compétents pour le faire) la gestion des problèmes techniques que soulève l'emploi de ces matériels.

Pour l'instant, nous ne pouvons pas proposer de solution satisfaisante. Cet état de fait est en gran-

de partie lié aux structures du CNRS et au mode d'évaluation des chercheurs et des ingénieurs en particulier

les **stations de travail** sont d'apparition plus récente. Elles sont essentiellement caractérisées par la notion d'application partagée, elles semblent être indissociables du réseau local. Dans ce contexte, on en trouve plusieurs réparties sur le réseau local d'une unité de recherche ; elles tendent à remplacer les mini-ordinateurs. Une certaine spécialisation apparaît, comme :

- outil graphique;

- serveur de calcul;

- serveur de fichiers;

- passerelles entre réseaux;

- ordinateur hôte d'un calculateur spécialisé, par exemple la machine parallèle CM2 fonctionne dans ce mode.

Une tendance actuelle consiste à utiliser ce matériel en conjonction avec des consoles graphiques lourdes, dénommées terminaux X, et réparties sur le réseau qu'il soit local ou international. Mais pour ces matériels, plus encore que pour les micro-ordinateurs, l'existence d'un personnel de maintenance devient crucial.

Le **développement du graphique** apparaît comme un élément permanent dans tous les domaines, pour la visualisation de résultats et pour une meilleure interaction "Homme-Machine" :

- de résultats de simulation;

- de structures spatiales de molécules;

- d'images de synthèse tri-dimensionnelles construites en temps réel;

- d'analyse interactive de données décrites dans des espaces de dimension élevée.

On peut penser que la possibilité de faire des traitements graphiques introduit une approche différente du traitement de données, philosophie parfaitement adaptée à la démarche scientifique représentée par un va-et-vient permanent "modèle-données".

Bien que certains domaines aient abandonné les gros moyens de calcul au profit des micro-ordinateurs et des stations de travail, l'existence de gros calculateurs dans de grands centres de calcul n'est pas remise en cause : c'est le seul lieu où puissent être mises en commun des ressources humaines et matérielles indispensables à l'ensemble de la communauté scientifique, en particulier pour des "simulations lourdes". Ainsi, la communauté des astrophysiciens ou celle de chercheurs en mécanique des fluides numérique a besoin de machines vectorielles d'une puissance de 60 Gigaflops (de l'ordre de 60 fois le Cray2 actuel) qui doivent apparaître dans un futur proche. Leur emploi optimal implique le développement, dans les équipes qui vont les utiliser, d'un savoir-faire actuellement inexistant sur les machines à grand parallélisme, le même type de besoin existe en météorologie, où la nécessité d'un traitement rapide devient une priorité absolue.

**L'acquisition** de données ressort davantage du thème sur l'instrumentation que du thème où la donnée est traitée après avoir été saisie. Passant nécessairement par un ordinateur, ces données, acquises par des instruments physiques ou dans des enquêtes, contraignent tout "praticien" à utiliser différents prétraitements et une présentation des résultats qui ne sont pas toujours innocents. La coupure entre l'acquisition et le premier traitement de données est, au moins en partie, artificielle : certains gros détecteurs utilisés actuellement en physique des particules sont des réseaux très complexes de processeurs, dont une fonction est le prétraitement en temps réel des données expérimentales. Dans la physique de l'atmosphère, le traitement est si étroitement imbriqué aux données qu'il en est quelquefois indissociable. Quand celui-ci correspond à un traitement du signal, à une analyse d'image il existe des théories permettant, de maîtriser ce que l'on fait, mais ce n'est pas toujours

le cas. D'autre part, il n'existe pas une théorie de l'acquisition de données optimales (comme il existe une théorie de la planification expérimentale); le tri est fait après acquisition, et l'on peut s'interroger sur le bien-fondé d'une telle pratique si généralisée : le prétraitement est une réponse partielle.

## 2 - LE LOGICIEL

Depuis la naissance de l'informatique, une mutation perpétuelle existe au niveau des langages de programmation. Depuis les premiers Fortran, de nouvelles notions sont apparues; le vieux Fortran lui-même s'est considérablement adapté. Toujours limité dans ses possibilités, il permet d'adapter le calcul numérique aux nouvelles architectures. C'est sans doute cette limitation qui a permis de développer des compilateurs permettant d'exploiter au mieux ces caractéristiques, comme par exemple la vectorisation.

Avant l'an 2000, on devrait voir se développer les langages orientés objet. Les notions d'encapsulation, d'héritage et de polymorphisme, qui sont à la base de cette vision de la programmation, doivent révolutionner les méthodes de travail en apportant sécurité, lisibilité, portabilité et simplicité dans les programmes. Il ne faudrait toutefois ne pas pécher par excès d'optimisme : notre *viscosité intellectuelle* est telle que les idées, même théoriquement excellentes, mettent beaucoup de temps à pénétrer les esprits et à modifier les pratiques. Il est clair qu'un important effort d'enseignement et de formation doit être fait pour faciliter cette évolution.

Enfin de la même manière, un effort devrait être fait dans le domaine du **génie logiciel**. Pour certains types d'application, de gros codes ont une durée de vie relativement longue; écrits par plusieurs personnes appartenant à différents laboratoires, il faut pouvoir assurer leur maintenance et leur évolution. Documentation et modularité sont indispensables : c'est justement un des buts du génie logiciel auquel devraient être formés les chercheurs.



### 3 - L'APPUI À LA MODÉLISATION : FAUT-IL DES MODÉLISATEURS ?

La majorité des chercheurs demande l'appui soit de mathématiciens soit d'informaticiens. Rares sont les disciplines qui auraient tendance à soustraire entièrement leurs problèmes à un "modélisateur-numéricien-informaticien". Mais selon le niveau de formalisme qu'il possède, le chercheur a des aspirations et des demandes différentes :

- en physique théorique, en mécanique, les problèmes concrets se rencontrent au niveau des systèmes d'exploitation (Unix), des réseaux, des logiciels graphiques, etc. Ils sont liés au manque d'ingénieurs plus que de numériciens;

- dans les domaines les plus variés, différents types d'équations sont utilisées : équations algébriques, équations aux dérivées partielles, équations intégrales. Plus que l'appui de numériciens, une confrontation des différentes équipes travaillant sur des équations similaires serait intéressante afin d'échanger leur point de vue, de parler de leur expérience et de leurs échecs;

- l'appui d'un mathématicien est quelquefois recherché, non pas pour écrire la ou les équations d'un modèle, mais pour vérifier la cohérence d'un problème déjà formalisé. Ceci sous-entend que le chercheur est suffisamment compétent pour écrire lui-même un formalisme de type mathématique. Or, si cette affirmation est généralement vraie dans le domaine des sciences exactes, elle devient rapidement fausse, à de très rares exceptions près, dans celui des sciences de la vie et des sciences humaines.

- Pour les sciences biologiques et les sciences humaines, dans la majorité des cas, la faible formation à la modélisation rend illusoire une autonomie totale des chercheurs. Les outils mathématiques potentiellement utilisables, et les formalisations qui leur sont attachées, recouvrent un champ beaucoup trop vaste des mathématiques : de la statistique à la théorie des jeux, en passant par les équations dif-

férentielles, sans oublier les techniques d'analyse numérique indispensables pour fournir des solutions à *ces* problèmes. La difficulté essentielle provient de l'existence d'un vaste choix de méthodes possibles, sans que celui qui doit les utiliser ait une maîtrise réelle sur leur stratégie d'utilisation. Ce qui est important est donc plus une formation à cette stratégie qu'une formation aux méthodes elles-mêmes.

- Dans le domaine des sciences humaines, le besoin d'une assistance technique réelle et efficace en informatique peut exister, en particulier quand il s'agit d'exploiter de grandes enquêtes d'histoire sociale ou de démographie historique, qui supposent *la* constitution de véritables banques de données factuelles, ou le traitement d'une langue rare transcrite dans un alphabet spécifique ; conserver les anciens modes de gestion manuelle est alors un verrou qui interdit le recours ultérieur à l'outil informatique. Il est aussi prioritaire d'assurer "l'interface" des logiciels anciennement utilisés avec ceux nouvellement acquis, pour assurer une bonne gestion des fonds documentaires.

### 4 - LA MODÉLISATION-SIMULATION DANS QUELQUES DOMAINES

Nous avons tenté de montrer l'existence de facteurs communs à différentes disciplines; mais au-delà de ces considérations générales, des facteurs spécifiques apparaissent. Nous allons donner quelques exemples qui nous semblent caractéristiques, sans prétendre naturellement à l'exhaustivité.

#### Physique théorique

La majorité des thèmes les plus prometteurs font appel à des moyens importants, ainsi la prédiction des propriétés de nouveaux matériaux, les phénomènes non-linéaires, les systèmes complexes. Par ailleurs, les connexions avec d'autres disciplines peuvent être très intéressantes; le problème du repliement des protéines présente des analogies pro-

fondes avec les verres de spin, et les idées venues de la physique statistique sont susceptibles d'y avoir un fort impact. De même, des progrès dans la compréhension de la turbulence tridimensionnelle doivent avoir des implications en météorologie.

## Etude du chaos dans les systèmes atomiques

Il est possible d'effectuer une modélisation très détaillée de certains systèmes atomiques. Ainsi, on a récemment découvert, que le chaos se manifeste à l'échelle microscopique dans les systèmes à deux dimensions (atome d'hydrogène dans un champ magnétique). Une résolution numérique des équations quantiques du mouvement est maintenant possible, la confrontation avec l'expérience a montré la validité du traitement théorique. D'autres phénomènes seront prochainement traités avec le même degré de précision, comme les corrélations fortes dans les systèmes à deux électrons, ou l'interaction entre atomes et champ magnétique intense. Des codes numériques performants permettent maintenant d'étudier de manière systématique les propriétés radiatives et "collisionnelles" des ions présents dans les plasmas astrophysiques (couronne solaire, enveloppes stellaires) ou de fusion (tokamaks). Les données qu'ils génèrent sont progressivement incorporées dans des banques de données et dans des modélisations des plasmas à l'échelle microscopique.

## Astrophysique

Les Sciences de l'Univers, et tout particulièrement l'astrophysique, ont très fréquemment recours à la modélisation multidimensionnelle : mécanique des fluides, magnéto-hydro-dynamique, hydrodynamique relativiste, cosmologie, dynamique à N-corps, sismologie solaire, transfert de rayonnement, traitement d'images, etc. On peut faire de la modélisation 2D de petite et de moyenne taille (jusqu'à 256 points de grille) sur des stations de travail interactives. Mais pour de grandes tailles, et surtout

pour la modélisation 3D, les machines de "haut de gamme" restent absolument indispensables.

Certains problèmes se prêtent bien au traitement par "parallélisme massif" : d'ici trois à quatre ans, il sera beaucoup plus performant d'utiliser des machines parallèles; il sera alors possible d'employer des machines dont la vitesse de pointe sera de quelques Teraflops. Pour la plus grande partie des problèmes qui ne sont pas aisément parallélisables, il faudra alors avoir accès à la nouvelle génération des machines vectorielles, utilisables dans un "contexte multiutilisateur"; mais alors, il faudra que les liaisons à très haut débit soient disponibles pour que les utilisateurs puissent y accéder.

Pour mémoire, il faut aussi rappeler que nombre de modèles astrophysiques s'appuient sur des **banques de données** stellaires ou extragalactiques comme celles gérées par le CDS (Centre de Données Stellaires de Strasbourg). Certaines sont des bases de données "orientées images" : leur accès implique aussi que des réseaux à haut débit soient disponibles.

## Mécanique : passage microscopique-macroscopique

De nombreux exemples de cette démarche se rencontrent en mécanique. Elle consiste à considérer que les variables thermomécaniques se décomposent en la somme d'un champ défini sur le milieu lentement variable, dit macroscopique, et d'un champ de perturbations variant à une échelle beaucoup plus petite, dit microscopique. On peut déduire les lois régissant le champ macroscopique des propriétés physiques microscopiques du milieu. Cette démarche a permis l'émergence de modèles très riches :

- la théorie de l'homogénéisation appliquée aux milieux périodiques, comme les composites à fibres;

- la dynamique moléculaire pour les milieux granulaires et la modélisation du comportement de

la "matière molle";- la modélisation du comportement des matériaux "classiques" en couplant des calculs numériques à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique portant sur un échantillon de graines;

- le mouvement de dislocations dans un réseau atomique pour mieux appréhender les mécanismes physiques de la déformation plastique

## **Simulation de réaction et compréhension de la réactivité**

En physique moléculaire, la dynamique quantique des réactions "atome + diatome" est accessible au calcul depuis peu, ce qui ouvre la voie à la compréhension détaillée des réactions chimiques en phase gazeuse. Ainsi, dans certains cas, on peut déterminer de manière précise la répartition vibrationnelle et rotationnelle des produits, l'influence de l'état de vibration-rotation des réactants et de l'énergie de collision. La comparaison de cette approche rigoureuse et des méthodes approchées moins précises, mais généralement plus facilement applicables, est un axe de recherche qui doit se développer dans un futur proche. Il devient possible de modéliser des réactions inaccessibles à l'expérience, que ce soit à cause de la présence de radicaux moléculaires instables ou de conditions extrêmes de température. Des retombées dans les domaines très variés sont possibles à moyen terme :

- meilleure compréhension des mécanismes de "formation-destruction" des molécules interstellaires;

- « analyse de la réactivité chimique et biochimique (dynamisme réactionnel, catalyse enzymatique);

- analyse des processus physico-chimiques qui se produisent au cours de la rentrée atmosphérique d'une navette spatiale;

- modélisation des milieux laser, de la haute atmosphère et de la couche d'ozone.

## **Modélisation des structures 3D des macromolécules biologiques et simulation de leurs propriétés dynamiques**

La simulation de propriétés physiques, chimiques ou pharmacologiques de molécules est aussi un très important domaine d'application. Il faut d'abord connaître la géométrie tridimensionnelle des molécules par mécanique moléculaire. Cette méthode principalement paramétrique est fondée sur la description d'un potentiel moléculaire aussi "raffiné" que possible, et elle fait appel à des méthodes quantiques. La recherche d'un minimum d'énergie pour un système à " $3n - 6$ " degrés de liberté (avec  $n > 50$ ) est un problème extrêmement difficile : la meilleure solution actuelle est l'utilisation de la dynamique moléculaire, qui est basée sur la simulation des propriétés dynamiques des molécules. La simulation de ces propriétés a été améliorée par des méthodes statistiques (du type de celles de Monte-Carlo) ou pseudo-mathématiques (comme le "recuit simulé") : ces méthodes permettent de limiter l'espace exploré des conformations ou de passer plus rapidement d'un minimum à un autre par des processus que la physique interdit.

Le succès de ces méthodes, à l'origine très confidentielles, réside dans la commercialisation de machines graphiques et de logiciels très performants, faciles à utiliser par de non spécialistes, chimistes ou biologistes. La possibilité de manipuler, en temps réel, un objet tridimensionnel, ajouté à l'aspect purement esthétique, a été déterminant dans ce succès : on pouvait apporter des réponses raisonnables à des questions, pour lesquelles des modèles (comme ceux de Dreiding) étaient inutilisables.

Une des applications est la "conception de médicaments". Deux approches sont utilisées. A partir d'une famille de composés actifs sur la même cible, on peut optimiser la structure du médicament, par une démarche encore très empirique. On peut aussi partir de la structure 3D du récepteur et concevoir des molécules dont les interactions avec la macromolécule sont prévues à l'avance. Ces me-



thodes font partie de l'arsenal du chimiste, mais elles ont encore un caractère très spéculatif et ne remplacent pas l'approche expérimentale. En recherche pharmaceutique, son enjeu économique est considérable : il est en partie responsable de l'essor de plusieurs grandes sociétés de matériel informatique. Les investissements considérables qui ont été réalisés leur garantissent encore de bien beaux jours : l'intuition bien dirigée a précédé le caractère rationnel de la recherche.

## Modélisation et analyse de séquences génétiques

L'analyse et la comparaison de séquences conduisent souvent à des "explosions combinatoires" dont la maîtrise demande le développement de méthodes originales. L'alignement de séquences implique l'utilisation de la programmation dynamique; la construction d'arbres phylogénétiques implique que l'on sache définir une mesure de ressemblance entre séquences (mesure qui n'a pas obligatoirement les propriétés mathématiques d'une distance). Certains apprentissages relèvent plus de méthodes provenant de l'Intelligence Artificielle que de techniques numériques. Le repérage des gènes dans une séquence ou la mise en évidence de signaux particuliers est davantage une exploration de réseaux de règles logiques qu'une suite algorithmique de calculs.

Il faut toutefois noter que la constitution de banques de données associant structures de biomolécules et séquences connaît aussi un fort développement : elles permettent la modélisation beaucoup plus fiable de structures 3D à partir de corpus de données complexes. La connaissance des relations "structure \* fonction" des macromolécules biologiques est un enjeu essentiel pour des applications dans les domaines de la santé et de l'alimentation.

## Environnement

Notre monde se caractérise par la prise de conscience que notre type de civilisation, par les ac-

tivités humaines qu'il suscite, peut entraîner des changements de l'environnement à l'échelle planétaire. En particulier, le climat planétaire peut être fortement déséquilibré par une modification de la composition chimique de l'atmosphère. Pour répondre à cette demande, qui ne touche pas que le monde scientifique, il faudra décrire l'évolution du système "Géosphère \* Biosphère"; cette description demande que l'on sache d'abord maîtriser les processus de base de cette évolution, puis leur couplage afin de les intégrer dans un modèle global : c'est l'objet des grands programmes tels que le "Programme International Géosphère \* Biosphère". Une quantité importante de simulation numérique en résultera : circulation globale océanique, modélisation géochimique, évolution climatique à long terme, dynamique des fluides géophysiques, turbulence, etc. L'intégration et le stockage d'un nombre très importants de données observées est aussi un problème essentiel, tout particulièrement pour la prévision météorologique. Ce même problème de bases de données se retrouve quand on veut reconstituer le climat passé, avec la constitution de bases de données polliniques au niveau international.

## Systèmes d'informations géographiques (SIG)

Les SIG actuellement utilisés assurent une gestion cohérente et interactive de bases de données cartographiques, à toute échelle, grâce à la modélisation de l'information géographique : modélisation topologique et/ou géographique d'objets graphiques élémentaires, modélisation relationnelle de leurs attributs.

Elle autorise l'existence d'opérateurs ouvrant un premier niveau d'analyse et, par conséquent, d'aide à la décision; mais la communauté scientifique pense qu'il faut doter les SIG de possibilités d'analyse plus poussées et de simulation : un groupe de chercheurs (GDR CASSINI) explore différentes voies pour y parvenir.

Il faut souligner le grand intérêt pratique de ces recherches, notamment dans les domaines :

- - de l'aménagement des territoires aux différentes échelles, de la commune à la CEE;

- de la combinaison des contraintes spatiales, environnementales, économiques, etc.

Les utilisateurs seraient non seulement les autorités territoriales et leurs ministères de tutelle, mais pourraient aussi être des grandes entreprises privées ou publiques,

## Linguistique

Dans le domaine des langues naturelles, la formalisation n'est apparue que récemment, au moment où la "linguistique"<sup>11</sup> se constituant comme science, a ajouté à l'objectif de description des langues celui d'explication du langage. Les années 60 ont vu la prolifération de formalismes variés recourant à des outils différents (mathématiques et logiques), ponant sur des objets (mots, phrases, discours) et des niveaux (phonologie, syntaxe, sémantique) divers, pour décrire des phénomènes de surface ou appréhender, au-delà de la multiplicité des formes, les règles intériorisées du fonctionnement de la langue. D'où certains désaccords, voire querelles d'école quant à la forme, la validité et la portée des modèles; d'où, dans une certaine mesure, la faiblesse de la modélisation en linguistique.

En France, cette faiblesse est aussi le résultat d'un cloisonnement étanche, à tous les niveaux de l'enseignement, entre les lettres et les sciences, et au fait que l'étude de la langue, comme d'ailleurs celle de l'histoire, est toujours considérée comme une discipline "littéraire" ! Par voie de conséquence, on peut déplorer l'insuffisance à la fois de la formation scientifique des linguistes et de l'intérêt des mathématiciens (et des logiciens) pour les langues naturelles.

Les enjeux scientifiques et socio-culturels liés au développement du traitement automatique du langage, écrit et oral, ont changé la donne. L'exploitation de vastes bases de données textuelles,

le développement de la communication entre l'homme et la machine et le traitement de la langue dans une perspective multilingue impliquent de dépasser le stade des simples manipulations de textes et des descriptions de surface, de surmonter l'obstacle de la compréhension automatique grâce à une formalisation poussée du niveau sémantique et pragmatique. On dispose à l'heure actuelle de logiciels déjà performants. Le développement des sciences du langage est un atout : il est important de développer les recherches dans ce domaine,

## PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS

Il est sûr que, dans les prochaines années, modélisation et simulation, appuyées et tirées par l'accroissement rapide des capacités des ordinateurs (vitesse et mémoire), verront leur importance s'accroître dans toutes les disciplines. Chacune de celles-ci a certes ses spécificités qu'il est impossible d'expliciter dans un rapport de synthèse, mais il est possible de dégager quelques tendances générales.

### 1 - MOYENS INFORMATIQUES

La puissance de calcul disponible aura des conséquences de plus en plus significatives tant sur le plan scientifique que sur celui des applications technologiques : les frontières de la connaissance devraient être repoussées, et la compétitivité des entreprises décuplée. Des problèmes plus complexes, comme ceux, liés au respect de l'environnement, surgiront, mettant en avant la notion de **risque** et de seuil de "nuisibilité". L'accès aux ressources de calcul, qui détermine la taille et la nature des problèmes abordables, sera de plus en plus, pour les chercheurs et les ingénieurs, un élément décisif dans la compétition mondiale. De même, la

rapidité de traitement ; par exemple, une prévision météorologique n'a d'intérêt que si elle parvient "à temps".

L'accès à des centres de calcul nationaux est un élément capital pour que la communauté scientifique et industrielle, engagée dans le domaine de la modélisation numérique, puisse disposer du matériel le plus puissant et le plus performant. En particulier, il ne fait aucun doute que le calcul parallèle se développera, en permettant une augmentation significative de la vitesse de calcul. Alors, les recherches sur la parallélisation d'algorithmes devront être encouragées. Il faut surtout ne pas sous-estimer les difficultés de réécriture des codes actuels : des codes, écrits pour certains modèles, demandent une centaine de milliers de lignes, et il a fallu plusieurs années pour les écrire. L'accès à des machines "modérément parallèles" peut être nécessaire dans une phase intermédiaire; celui à des machines parallèles pourrait être réservé à des applications pilotes ; dynamique moléculaire ou simulation directe de la turbulence, par exemple.

Dans ce contexte, la **formation** d'un nombre important de chercheurs et d'étudiants à l'utilisation de supercalculateurs et au calcul intensif apparaît comme une des clés de notre développement. Un pays comme le Japon a déjà entrepris d'installer des moyens de calcul considérables dans les universités, et de former un nombre important d'étudiants à leur utilisation. Pour le calcul scientifique, des initiatives de ce type devraient être prises pour la formation au calcul massivement parallèle et pour l'apprentissage du génie logiciel.

Si on reconnaît généralement aux chercheurs français une excellente capacité dans la production de bons logiciels, on est plus dubitatif sur leurs compétences pour les commercialiser. Il paraît donc important d'associer chercheurs et diffuseurs de logiciels. Il serait dommage de "laisser dans des cartons" des produits qui, un jour ou l'autre, seront commercialisés par d'autres : il y a perte économique évidente, mais aussi absence de stimulation de la recherche, deux des enjeux considérés comme essentiels.

Nous devons aussi mentionner le domaine de **l'Intelligence Artificielle** : ses possibles utilisations ont fait naître un excès d'espoir dans la mesure où le "**raisonnement sur des connaissances**" apparaissait à certains comme beaucoup plus prometteur que le "**calcul sur des données**". Elle a souvent, été considérée comme la seule planche de salut quand le caractère incomplet, flou, voire contradictoire des informations disponibles est la règle. Elle devrait retrouver un rôle essentiel dans toute la modélisation du raisonnement d'un utilisateur d'enseignement assisté; en particulier, pour arriver à déceler des "fautes de raisonnement". Les perspectives sont importantes si on veut arriver à "maîtriser" les différents modes de raisonnement sur ordinateur et faciliter l'interaction avec son utilisateur. Ceci illustre la relation modèle \* informatique, et rejoint le domaine des Sciences Cognitives,

## 2 - THÉORISATION ET PROBLEMES CONNEXES

Enfermé dans sa "logique locale", le chercheur n'a accès qu'à un nombre très limité de méthodes mathématiques. Il maîtrise plus ou moins bien celles déjà connues dans sa discipline, celles que son parcours de formation lui a permis d'acquérir et celles que sa curiosité et le hasard lui ont fait découvrir. Mais souvent le transfert d'un domaine scientifique vers un autre peut se révéler plus complexe; le chercheur y est généralement mal préparé, tant la pratique de la pluridisciplinarité est peu valorisante pour sa propre carrière même s'il est personnellement convaincu de son intérêt.

Même dans le domaine mathématique, la spécialisation est extrême : un spécialiste de géométrie ou de théorie des nombres aura des connaissances en statistique ou dans la stabilité d'une méthode numérique bien inférieures à un technicien, même allergique à la formalisation mathématique, travaillant dans un laboratoire de biologie. Dans les sciences de la vie et dans les sciences de l'homme, nous arrivons ainsi à ce paradoxe : le mathématicien, créateur d'outils de formalisation, sait moins bien com-



ment employer ces outils qu'un utilisateur qui n'en maîtrise pas toutes les conditions d'application.

Il manque actuellement dans la science moderne un "plus" qui lui permette de dépasser la seule technique où elle a tendance à s'enfermer. On tient rarement compte des principes fondamentaux que nous rappelons ci-dessous.

- Quand l'expérience est possible, les relations **"Expérience • Modèle"** que nous avons évoquées ci-dessus posent des problèmes épistémologiques. Nombre de chercheurs dans les domaines les plus variés ont tendance à négliger, voire à oublier, le "retour à l'expérience". On peut penser que l'outil numérique adapté à une modélisation permet l'économie de nombreuses expériences, et que la modélisation oriente vers "l'expérience" optimale. Mais l'affirmation que l'on peut se passer d'expérience peut avoir, en particulier sur la formation des plus jeunes, un effet fondamentalement pervers.

- La "quantité de connaissances" pouvant être acquises par un être normal étant nécessairement limitée, tout chercheur ne peut qu'avoir une compétence partielle sur certains types de modèles. Il est souvent hors de ses capacités de connaître les modèles équivalents et les difficultés numériques attachées à leur résolution; il semble donc plus important de former les chercheurs à une **"stratégie d'utilisation de modèles"** plus qu'à une utilisation technique de modèles.

- De nombreuses questions posées aux scientifiques sont fortement imprégnées par la notion de causalité : "une moindre consommation d'alcool diminue-t-elle un type particulier de cancer ?" ou "quelle quantité de dioxyde de carbone peut entraîner des changements climatiques catastrophiques dans les prochaines cent années ?", Pour aller au-delà de la recommandation de simples mesures conservatoires, il est important que les chercheurs réfléchissent davantage sur les concepts sous-jacents aux trois mots : **"Hasard \* Complexité \* Causalité"**. La causalité va beaucoup plus loin que la simple explication déterministe d'un événement, bien que celle-ci soit souvent essentielle. Le simple

raisonnement statistique élargir l'étendue des lois déterministes pour y inclure l'explication de phénomènes de masse, dont le principe d'incertitude d'Heisenberg est une illustration. Il va bien au-delà de la vision souvent simpliste de la modélisation mathématique et de sa double interprétation : "réalité objective ou rationalité subjective ?"

- Au moment où les repères scientifiques manquent pour donner une vue un peu unitaire à notre connaissance, vue qui devrait respecter l'extraordinaire complexité de notre monde, on peut penser que la démarche modélisatrice constitue un des outils dont dispose la communauté des chercheurs pour bâtir les fondations d'une **"théorie de la théorisation"**. Cette théorie pourrait fournir ces repères indispensables.

On a en outre l'impression que **"la technique domine bien souvent la réflexion"**. Selon que l'on est pessimiste ou optimiste, on peut déplorer plus ou moins amèrement, chez nombre de chercheurs, l'absence de réflexion au-delà de leur propre champ d'activité. Ce constat peut néanmoins être tempéré par le fait qu'un "retour à l'intuition" se manifeste sans aucun complexe auprès de jeunes chercheurs, en particulier parmi les plus théoriciens d'entre eux.

### 3 - QUESTIONS DE STRUCTURE

les questions de structure sont évoquées par la majorité des chercheurs : la difficulté de se consacrer aux "tâches essentielles" est attribuée à l'absence de moyens d'appui humains ; ingénieurs et techniciens. Le recrutement d'ingénieurs en génie logiciel, au sein d'équipes faisant beaucoup de simulation numérique paraît nécessaire. Ce serait une manière d'aider le développement, et sans doute la commercialisation, de logiciels de portée générale. Dans des disciplines moins formalisées, ce type de recrutement, lui aussi nécessaire, bute sur la difficulté de fournir à l'informaticien un cadre de réflexion qui lui permette de ne pas se cantonner dans le rôle d'un calculateur de luxe; c'est sûrement possible, bien que difficile.

Le problème est au moins aussi crucial, pour les mathématiciens et les logiciens : le très petit nombre d'entre eux qui s'orientent vers la recherche en sciences de l'homme est la cause essentielle de la faiblesse de la modélisation et de la simulation dans ces disciplines. Tout ce qui peut favoriser un rapprochement, tout ce qui peut encourager un travail pluridisciplinaire est souhaitable. La mise en place d'un PIR modélisation en sciences de l'homme peut créer ce mouvement.

Mais les maître-mots qui ressortent sont ceux de :

- **formation** ; on demande fréquemment des écoles sur des thèmes de modélisation et de simulation; la possibilité de rencontrer d'autres chercheurs ayant les mêmes types de problèmes techniques apparaît aussi. C'est, sans aucun doute, une des façons les plus naturelles d'associer des disciplines différentes et de faire éclater les cadres trop rigides dans lesquels vivent nombre de chercheurs;

- **fédération** : la création de GDR autour de thèmes fédérateurs permettrait d'assurer un lien entre ceux qui pratiquent modélisation et simulation. C'est un moyen pour créer des **réseaux d'échanges d'informations**.

## CONCLUSION

La modélisation un appui à la pensée ? Dans l'activité créatrice des chercheurs, il y a presque toujours deux parts : Tune de recherche libre, l'autre de recherche d'ingénierie. Quelles que soient les disciplines, elles coexistent à des degrés divers chez une majorité de chercheurs. La modélisation, outil de conceptualisation, est présente dans chacune d'elle.

Tout modèle est un outil d'approfondissement de nos connaissances mais c'est un aussi un outil qui, appuyé sur la puissance des ordinateurs, a quelquefois tendance à remplacer la confrontation avec le réel. C'est un danger, mais c'est aussi un extraordinaire moyen d'explorer notre monde, qu'il soit inerte, vivant ou pensant. Son emploi raisonné est un formidable pari sur l'intelligence humaine.

**Richard Tomassone**

*Président du groupe 22*

*avec la collaboration de*

*Jean-YvesLallemand*

*Sébastien Candel*

*Jean-Michel Drouffe*

# 23

## LES OUTILS DE LA RECHERCHE : INSTRUMENTS, TECHNOLOGIES

### INTRODUCTION

Le *Rapport de conjoncture* du CNRS a pour principe d'organiser sa réflexion en thèmes scientifiques multidisciplinaires. Poussant cette logique jusqu'au bout, le Comité National a demandé à un échantillonnage de toutes les compétences au sein du CNRS d'entamer une réflexion sur le thème général mais central des outils de la recherche. Il est certes aisé de réaffirmer que, dans la plupart des secteurs, les instruments et la technologie sont devenus déterminants pour la progression de la recherche et un passage incontournable si on la veut réellement compétitive. Cependant les difficultés rencontrées pour synthétiser les différentes frustrations qui se sont manifestées lors des échanges au sein de ce groupe de réflexion montrent qu'une analyse ancrée sur la multidisciplinarité hors de son contexte, c'est-à-dire hors du concret d'une problématique d'ordre scientifique, est difficile à mener. En effet entre le mathématicien devant sa feuille, l'historien dans sa bibliothèque, le physicien des particules devant son accélérateur, le sociologue ou l'ethnologue utilisant une grille d'analyse ou un guide d'entretien face à la population qu'il étudie, le biologiste devant un séquenceur, ou l'astronome devant son télescope, les rapports semblent ténus. Leurs instruments sont de nature très différente.

Mais les types de situations ou de problèmes auxquels ils sont confrontés peuvent être analogues, l'intérêt d'une approche synthétique qui fait apparaître des structures semblables, permettant de formaliser les problèmes afin de mieux les résoudre au niveau de l'ensemble de la recherche, est manifeste. Malgré les exemples concrets d'où naissent les réflexions et qui illustrent les conclusions, le risque de glisser vers l'abstraction et les généralités est difficile à éviter. Par ailleurs, le groupe ne prétend pas faire ici un état *des* lieux des outils de la recherche, travail qui nécessite un temps et des moyens spécifiques importants. La commission n'entend pas non plus décrire ni promouvoir une politique instrumentale spécifique. Ce rapport vise à donner l'état d'une réflexion générale sur quelques questions qui ont paru cruciales à propos de l'instrumentation. La conclusion unanime de la commission est que l'expérience, aussi difficile soit-elle, méritait d'être entreprise et demande à être poursuivie. Les progrès de la recherche sont en effet conditionnés, et le seront de plus en plus, par les progrès de l'instrumentation et le développement d'outils nouveaux (1)

(1) Ceci vient d'ailleurs d'être reconnu de façon éclatante par l'attribution du Prix Nobel de Physique à Georges Charpak pour sa contribution majeure au développement de détecteurs pour la physique des particules et, plus généralement, à la détection de rayonnements avec des applications en médecine et en biologie.



# LES ENJEUX

## OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES INSTRUMENTS

La complexité sans cesse croissante des instruments a profondément modifié la nature du métier de chercheur. En physique, celui-ci doit de plus en plus être un professionnel de la technologie car, sauf cas exceptionnel, la "manip de coin de table" n'existe plus, à moins que le reste de la table ne soit déjà bien fournie. Dans d'autres disciplines, le manque de savoir technique et de formation instrumentale peut signifier un retard à la diffusion et la vulgarisation de diverses techniques de pointe à des équipes non spécialistes. Celles-ci, pourtant, en ont besoin.

L'instrumentation, non seulement est partie intégrante de la recherche, mais elle joue de plus en plus un rôle moteur dans sa qualité et sa progression. Les progrès dans un domaine débouchent dans d'autres : par exemple les supraconducteurs pour la technologie *des* accélérateurs, les lasers en chimie et biologie, les détecteurs pour l'astronomie, et l'informatique partout. Cela suppose cependant une bonne adéquation entre besoins réels, moyens et compétences. Le coût toujours croissant de l'instrumentation pose, lui aussi, des problèmes nouveaux et doit être pris en compte dans toute stratégie de recherche.

Prenons ainsi l'exemple de la communauté de chimie et de biologie structurale, qui traditionnellement puise en physique et en chimie ses gros outils : cristallographie des rayons X, microscopie électronique, et très grands instruments (LURE, ILL, LLB et bientôt l'ESRF). L'évolution récente a consisté en une diversification extraordinaire des instruments et des technologies : spectrométrie de masse, lasers, RMN, le tout associé à de puissants moyens informatiques. Or ces outils ne sont pas à la portée immédiate de ces équipes, que ce soit en

terme de *coût* ou de *compétence* dans l'utilisation. De plus, l'augmentation des coûts ne s'est pas accompagnée d'un mouvement équivalent des crédits. Il s'agit donc ou de faire un effort financier extraordinaire par rapport aux crédits affectés maintenant aux équipements dits mi-lourds, ou de gérer au mieux la pénurie institutionnalisée en évitant le saupoudrage, ou encore de trouver des solutions originales. Dans cet ordre d'idée, la gestion actuelle des instruments fait apparaître l'idée fondamentale de *regroupement des besoins et des compétences*, c'est-à-dire celle de masse critique. De fait, c'est autour d'outils sur un site que se crée concrètement une grande partie des *actions interdisciplinaires*, qui sont à la base des progrès actuels de la science. Les grands instruments de la recherche réussissent en général cette intégration. Cependant beaucoup de domaines scientifiques sont plutôt demandeurs d'une accumulation de moyens plus modestes mais de très haute technologie. La solution naturelle passe alors par une *mise en commun des moyens* existants ou futurs.

De même on assiste à un *changement de mentalité* qui d'abord se manifeste par le goût des nouvelles générations pour les nouvelles technologies et instrumentations, mouvement d'ailleurs mal accompagné par les structures existantes au CNRS, en particulier par celles chargées des évaluations. Les enjeux sont la formation des acteurs actuels de la recherche, qui pourrait impliquer une action altruiste, volontaire ou non, des laboratoires les mieux pourvus ou les plus compétents. Tout aussi concerné est le recrutement des jeunes, peut-être moins sensibles que leurs aînés aux aspects de l'abstraction, mais par contre plus soucieux de réalisations pratiques.

Finalement il apparaît que la *connaissance des facteurs économiques* est un aspect important de l'instrumentation. La capacité à estimer le coût d'une expérience à court, moyen et long terme devrait en premier lieu favoriser l'optimisation des moyens. De plus, cette connaissance devrait aussi favoriser les rapports avec les acteurs de l'économie et le secteur industriel en particulier. Cette interface d'un organisme public comme le CNRS avec les en-

treprises, les PME-PMI en particulier, est ambiguë mais vitale pour ce secteur de l'instrumentation qui, en France, souffre d'un manque de compétitivité face à la concurrence internationale.

L'enjeu que ces évolutions font apparaître est donc celui d'une nécessaire *restructuration dans l'organisation des ressources instrumentales*, qui affecte aussi bien les équipes que les mentalités et les relations avec les forces économiques. *De la capacité à optimiser l'utilisation des moyens et des compétences, à maîtriser les coûts, à promouvoir la pluridisciplinarité, dépendront la qualité, l'efficacité et la compétitivité de la recherche au CNRS.*

## DES DEFINITIONS OPÉRATIONNELLES PLUTOT QU'ADMINISTRATIVES

Les instruments de la recherche peuvent être, de manière générale, définis comme les outils permettant d'observer, de découvrir, voire de mesurer et d'analyser le monde, la société, les hommes, et aussi d'agir sur la matière et/ou de faire œuvre de création.

Du point de vue administratif, la classification des instruments suit des règles précises en fonction de leur coût (équipements, équipements dits "mi-lourds", très grand équipement ou TGE). A partir de 300 KF et jusqu'à 10 MF, ou exceptionnellement 15 MF, on parle de mi-lourds. Le TGE, désormais européen, avec un impact scientifique international (cf. définition d'avril 1992), est un instrument dont l'importance pour la communauté scientifique et le coût de construction, rarement inférieur à 100 MF, justifient un processus de décision concertée au niveau national (2). Cette classification se traduit donc par des procédures de financement différentes sui-

vant les cas, mais étant donné leur rôle de pôle de rassemblement, le financement des TGE est en général assuré par tous les organismes impliqués dans la discipline.

La classification, par coût fait aussi apparaître un hiatus entre les mi-lourds et les TGE, rendant arbitrairement très difficile - sinon impossible - le financement d'installations intermédiaires que l'on pourrait dénommer "lourdes".

Sur le terrain, la vision est différente. Pour les sciences dites "dures", les instruments vont du capteur qui peut être miniature et qui réalise l'interface avec le phénomène à mesurer, au système prototype résultat du travail de toute une équipe, jusqu'au très grand instrument. De ce fait, les problèmes sont de nature très différente. Pour le capteur, les progrès seront réalisés par exemple par un étroit contact avec la recherche fondamentale la plus avancée, permettant de mettre en application un nouvel effet physique. Pour les très grands équipements, les percées technologiques sont aussi très importantes, mais encore plus critique est la maîtrise des coûts, les deux paramètres pouvant d'ailleurs être liés.

On peut classer les instruments de la recherche suivant leur degré de complexité, c'est-à-dire depuis la brique jusqu'à l'édifice.

### 1 - DES MESURES PHYSIQUES ET CAPTEURS...

Il s'agit là du domaine de l'instrumentation situé en principe le plus à l'interface entre la science et ses applications. Il consiste à découvrir (ou améliorer ce qui existait déjà), à mettre en œuvre et à utiliser *de nouveaux concepts ou de nouveaux effets physiques aux fins de nouvelles mesures* plus fines, ou carrément innovantes.

Parmi les exemples récents, on peut citer le laser qui a donné naissance à un monde de méthodes spectroscopiques, l'effet tunnel (cf. le micro-

2) Voir, en annexe, la liste des Grands instruments scientifiques.

slope), la supraconductivité à haute température, les CCD,.. On remarquera, même si l'idée initiale provenait des milieux de la recherche fondamentale, que la plupart de ces percées se sont concrétisées dans des laboratoires industriels, montrant les énormes concentrations techniques et financières exigées. De même, deux exemples empruntés à l'optronique montrent que la recherche universitaire peut aussi s'alimenter sur d'autres secteurs : ainsi les détecteurs infrarouges, aujourd'hui partenaires indispensables de l'astronomie, et l'optique adaptative, fruit des recherches sur l'arme laser, découlent de la recherche militaire.

Le passage du concept ou de la découverte à un nouveau principe de mesures peut se révéler aisé. Ce qui l'est moins est le passage à l'acte c'est-à-dire l'élaboration du *système de mesures* proprement dit.

## 2 - ... À LA CONCEPTION D'INSTRUMENTS

Conçu partiellement ou en totalité par un laboratoire, l'équipement prototype est par principe à la pointe de la technique. Il découle le plus souvent d'une avancée dans les capteurs, mais il peut aussi être un outil qu'il aura fallu créer pour un besoin de la recherche non satisfait commercialement. Par exemple, en astrophysique, en physique des particules ou nucléaire, les chercheurs développent leurs propres instruments, parfois en un exemplaire unique, et ce de plus en plus souvent sur une base internationale. Cet équipement peut impliquer une collaboration entre différentes équipes, la multidisciplinarité, des relations avec un industriel (par exemple thermo-balance, caméra d'astronomie, lasers très spécifiques, ...). Le plus souvent, il a besoin des meilleurs savoir-faire développés dans différentes disciplines, matériaux, électronique, informatique, optique, etc.

La suite logique du prototype, le processus de valorisation, est la construction d'une maquette qui donnera naissance à un ou des instruments de

laboratoire standards produits par l'industrie. Pour le CNRS, l'objectif est aussi de pouvoir exploiter rapidement dans différents secteurs les savoir-faire développés dans l'un d'eux. Il s'agit, comme on ne le sait que trop, d'un des points qui souffre le plus de difficultés : la *recherche dite appliquée en France*, avec ses nombreux blocages psychologiques ou institutionnels, comme on le verra plus loin de façon plus précise.

## 3 - L'INSTRUMENT DE LABORATOIRE (DE L'ÉQUIPEMENT DE BASE AU "MI-LOURD")

C'est l'équipement de laboratoire d'usage général, pouvant aller jusqu'à être un équipement mi-lourd très spécifique requérant un ou plusieurs "servants". Sa finalité est souvent très précise (microscope électronique, grand spectrographe, spectromètre de masse, ...). Il est produit le plus souvent par l'industrie américaine ou japonaise, et beaucoup plus rarement européenne : les rares cas de succès français, tels les bâtis d'épitaxie par jets moléculaires ou les spectromètres Raman, ne doivent pas être l'arbre cachant la forêt. Il est vendu à des coûts qui grèvent lourdement les maigres crédits d'équipements des organismes publics, ou qui en retardent l'acquisition par les laboratoires.

Outre le problème de l'achat, il peut être difficile de le faire fonctionner de façon efficace soit par manque de moyens financiers (crédits de fonctionnement non prévus dans la phase d'achat), soit par manque de formation ou de motivation du personnel. La maintenance des instruments mi-lourds, comme celle de nombreux petits équipements, est souvent d'un coût très élevé. Pour les mêmes raisons, ces équipements ne sont pas toujours en mesure de jouer un rôle *d'accueil* pour des utilisateurs extérieurs.

Par ailleurs, il faut souligner, pour les sciences humaines et sociales, que le coût des instruments, parfois Immatériels, est équivalent à celui des ins-



truments mi-lourds d'autres disciplines. Ainsi certains sondages ou enquêtes auprès de populations d'accès malaisé ou dans des centres documentaires éloignés dépassent le MF.

#### 4 - DE L'ÉQUIPEMENT LOURD AU TRES GRAND ÉQUIPEMENT

Le très grand équipement tel qu'il est défini habituellement, qu'il soit national ou international, est soit un instrument spécifique destiné à une seule discipline scientifique - mais avec une base d'utilisateurs très large (cf. les télescopes de l'ESO, le CERN) ou réduite mais d'intérêt général (JET pour la fusion thermonucléaire magnétique contrôlée, VIRGO pour la détection d'ondes gravitationnelles par interféromètre laser) -, soit un grand outil unique (ESRF par exemple) qui par ses lignes (ici de rayons X) fournit un service à des utilisateurs d'horizons variés,

Dans le domaine des sciences humaines et sociales, ce sont, les bibliothèques et les centres de documentation (cf. l'INIST par exemple) qui sont l'équivalent des TGE "scientifiques".

Comme souligné précédemment certaines classes d'outils (dits lourds) ne remplissent pas exactement les conditions financières qui en feraient des grand instruments tout en respectant la définition (installations Lasers du LULI ou autres).

Les TGE sont un des moteurs essentiels de la recherche, malgré les récriminations dont ils peuvent faire l'objet de par les énormes crédits d'investissement et frais de fonctionnement qu'ils impliquent. Ils pèsent en effet de façon significative sur la distribution et le partage des moyens.

Les TGE intègrent tous les types d'instruments déjà décrits. Aux TGE sont donc associés des mots clés tels que recherche de laboratoire, recherche industrielle, équipes interdisciplinaires, coordination moyens humains. C'est probablement dans ce domaine, comme dans tous ceux où le *prestige* joue

un rôle moteur, que la France sait le mieux se distinguer sur la scène scientifique internationale.

#### 5 - DOMAINE D'APPLICATION DE CES DÉFINITIONS

Il est assez remarquable que cette nomenclature convienne à des domaines aussi différents que la physique, la biologie ou les sciences humaines. Ainsi la notion de capteur, associé de plus en plus à l'informatique, semble jouer un rôle central : un exemple en est l'omniprésence des techniques d'imagerie et de télédétection spatiale en modélisation du signal, écologie, bilan radiatif, géologie, cartologie,.. Les techniques de traitement d'Images sont, de par leur sophistication, encore en plein essor et donc justifiables de l'appellation d'outils d'équipes et d'un effort de valorisation important. Cette notion de capteurs se retrouve aussi dans l'étude des animaux dans leur environnement naturel (suivi d'oiseaux par balises Argos, systèmes miniaturisés d'acquisition de données fixés sur les animaux, ...). Dans certaines disciplines, comme par exemple les disciplines d'observation de la terre (climatologie, météorologie, géochimie, hydrologie, ...), les dispositifs de terrain sont organisés en réseaux qui s'apparentent aux équipements lourds d'intérêt national

Cette classification laisse de côté des problèmes importants comme l'élaboration des matériaux, domaine à la frontière de l'instrumentation proprement dite, mais dont elle est le complément indispensable. Ces difficultés apparaissent par exemple en mécanique quand des matériaux pointus doivent être fabriqués en grande quantité. En géologie, il s'agit par exemple de l'élaboration de standards pour microsonde afin de calibrer les roches.

Parmi les sciences humaines, l'archéologie, en raison de ses besoins d'analyse sur le terrain, est celle qui est le plus redevable de ces analyses physiques et chimiques. Les méthodes plus physiques pénètrent aussi d'autres secteurs de ce domaine,

ainsi en va-t-il de l'acoustique pour la phonétique. Pour les sciences humaines, les moyens d'enregistrement audiovisuels sont des instruments importants. Mais pour une expérience de sociologie que constituent une enquête et son analyse, l'instrument (le sondage par questionnaire) est de nature plus immatérielle. En histoire ou en ethnologie, les publications elles-mêmes sont des instruments de recherche : de même, en linguistique, les index, les nomenclatures sont des instruments de recherche non matériels mais d'un coût élevé, ne serait-ce que par le temps nécessaire à leur conception et à leur élaboration. En outre, les nécessaires traitements automatiques imposent des relations interdisciplinaires et exigent des moyens importants.

Des bibliothèques, des dépôts d'archives, les musées, par les recueils de textes ou d'images qu'ils contiennent, constituent souvent l'instrument même de la recherche en sciences humaines et sociales. En outre, les *missions* font aussi partie des instruments. Ainsi, par exemple, la "linguistique de terrain", que ce terrain soit éloigné ou non du laboratoire, s'appuie nécessairement sur des missions. Elles sont le seul moyen, de recueillir les données à étudier. Elles jouent le rôle de capteurs pour de nombreux domaines, tels que l'ethnologie, la sociologie, la linguistique, la communication, etc.

Nombre de problèmes de *valorisations d'optimisation* des outils et des personnels se retrouvent là comme dans les sciences dites "dures".

## RELATIONS RECHERCHE - INSTRUMENTS

Les rapports entre recherche et instruments sont complexes et dépassent de beaucoup le simple concept de la fin et des moyens. Ainsi, par exemple, en sciences humaines et sociales, la publication des corpus peut être conçue soit comme

moyen, soit comme fin. Dans tous les domaines scientifiques, les contradictions de la Science et de ses acteurs, oscillant entre la quête de la connaissance pure et les services de plus en plus attendus par la société qui les alimente, éclairent les relations entre recherche et instruments. Les avancées de la connaissance scientifique ont certes pu se faire dans les premiers temps d'une façon relativement indépendante des contraintes économiques, ce qui ne veut pas dire indépendamment des avancées technologiques. Les sciences humaines ont évidemment bénéficié d'une manière fondamentale de l'invention de l'imprimerie et de la généralisation des bibliothèques, de même que l'astronomie moderne et les progrès de la mécanique et des mathématiques qui s'en sont suivis ont vu le jour grâce à la mise au point des lentilles optiques, des lunettes, puis des télescopes. Il est instructif de noter que ces progrès dans la connaissance de la mécanique céleste ont joué un rôle majeur dans la primauté donnée à la Raison, à l'établissement, du Siècle des Lumières, forgeant donc le monde tel que nous le connaissons.

Plus concrètement, de nos jours, les implications dans la vie de la société industrielle sont devenues si denses qu'il est maintenant impossible de raisonner uniquement en termes de "sciences pures". Applications et incidences bénéfiques ou néfastes font désormais partie intégrante de la Science. Inversement, bien que les instruments soient *apriori* neutres, des jugements de valeur implicites, philosophiques, éthiques, politiques, ou des critères simplement économiques, émaillent les choix scientifiques et jouent aussi leur rôle dans la façon d'envisager les relations entre recherche et instrumentation.

On met en avant le concept de "recherche appliquée", qui ainsi apparaît comme devant s'opposer à celui de "recherche fondamentale" (3) Cette

(3) Rappelons les missions officielles du CNRS : 1. Assurer les progrès de la connaissance dans tous les domaines de la recherche fondamentale, 2. Valoriser les résultats de la recherche, 3. Diffuser l'information scientifique et technique et 4. Former par la recherche.

distinction se retrouve donc dans les missions et les structures mêmes du CNRS. Cependant, qu'il s'agisse de recherche fondamentale et/ou appliquée, la recherche technologique et les instruments en sont un détour obligé. Les caractéristiques, encore une fois, dépendent des secteurs de recherche considérés. En physique nucléaire, la construction d'un nouvel accélérateur, d'un nouveau détecteur, repose presque toujours sur une nouvelle technologie ou sur l'optimisation d'une technologie. Pour les accélérateurs, la mise en œuvre massive d'aimants ou de cavités accélératrices supraconductrices peut faire l'objet de recherche-développement pouvant s'étendre sur plusieurs années, avec des contraintes de performance, fiabilité et coûts qui imposent une organisation de type industriel. Le développement d'outils peut ainsi mener à des découvertes imprévues dans d'autres domaines. Qui aurait pu penser que la vie dans les grandes profondeurs était possible avant la découverte des sources hydrothermales par les sous-marins ?

Il convient de rappeler que dans tous les domaines, y compris les sciences humaines, la diffusion de l'informatique bouleverse le mode de traitement des données. La quantité de données pouvant être recueillies, stockées, utilisées et l'accélération de leur exploitation ont amené les chercheurs non seulement à résoudre les problèmes autrement, mais aussi, et ceci est plus important, à formuler de nouvelles questions, à envisager l'augmentation des connaissances sous de nouveaux angles, à modifier leur attitude vis-à-vis du processus de recherche lui-même.

## 1 - LA CRÉATION D'INSTRUMENTS

En 1982, une année après la remise de son prix Nobel, Nicolas Bloembergen déclarait à ce propos : *"It gives one pause to think that all types of lasers were first realised in industrial laboratories, research labs of industrial organisation, and, in fact all in the USA... It clearly requires the focusing of a large technological background in many different fields to achieve a new type of lasers."*

Comment dès lors répondre à de tels défis alors que, par exemple, la simple découverte des lasers demandait, il y trente ans déjà, trop d'efforts techniques et financiers, même pour le riche système universitaire américain ? Une ébauche de solution pourrait être offerte par l'analyse des relatifs succès des grands instruments français et européens. Ces disciplines bénéficient d'un "lobby" scientifique suffisant s'alimentant donc sur une clientèle importante, souvent internationale. Ils bénéficient de crédits d'investissement lourds, de l'apport des technologies les plus en pointe et de collaborations interdisciplinaires. L'exemplarité s'arrête là car, d'une part, les liens avec la compétitivité économique de ces grands instruments ne sont pas toujours très évidents, et, d'autre part, la recherche plus légère implique des équipements de bien plus courte durée de vie. De plus il ne faut pas négliger que la productivité des petites équipes est souvent bien meilleure que celle des grandes. Les TGE l'ont tellement bien compris qu'ils favorisent l'existence de petites équipes de base autour d'eux, compléments indispensables au développement de prototypes.

Le programme ULTIMATECH répond, dans le créneau des techniques "ultimes", nouvelles et pointues, à un souci de favoriser le développement d'une instrumentation innovante et sa diffusion rapide vers les disciplines voisines. On peut dès lors espérer stimuler le développement d'instruments et de projets intrinsèquement à risques dans les domaines de pointe, assurant un suivi et une cohérence sur plusieurs années de programmes de développement instrumental. Son complément serait une ouverture vers l'aval par l'intermédiaire d'appels d'offres en commun avec le MRT. Trois thèmes prioritaires ont bénéficié de ce programme ; nano-technologies, capteurs et détecteurs, optique et lasers. Ce programme ne couvre cependant pas l'ensemble des problèmes relatifs aux prototypes, qui sont traités avec une plus ou moins grande attention ou priorité dans les départements scientifiques. Le rôle de la formation des acteurs, ici essentiel, veut aussi dire une politique concertée à un autre niveau.



## 2 - IMPORTATION ET EXPORTATION D'INSTRUMENTS

Si la physique conserve la tradition de fabriquer ses propres prototypes, il n'en est pas de même dans d'autres disciplines, qui préfèrent importer leur instrumentation de la physique ou de la chimie, quitte à l'adapter à leurs besoins spécifiques. C'est ainsi que l'archéologie, qui associe des spécialités diverses correspondant au regroupement de multiples techniques, trouve des méthodes de datation dans le domaine des faibles radioactivités et de sauvegarde grâce à la physico-chimie. C'est ainsi que la biologie a depuis longtemps développé ses propres montages autour de générateurs de rayons X, de microscopes, ou de divers spectromètres.

Le cas de la biologie mérite cependant une attention particulière. L'introduction d'outils nouveaux, et dans des domaines variés, est actuellement en pleine expansion : RMN, spectrométrie de masse, microscopes confocaux, microscopes à champ proche, à effet tunnel, à force atomique, détecteurs divers (rayons X, fluorescence, radioactivité), analyseurs d'images, et leur informatique associée. Par ailleurs, en retombée de la biologie moléculaire, se développe de plus en plus une instrumentation finalisée pour la biologie "lourde" : chromatographies haute performance en phase liquide, électrophorèse capillaire, séquenceurs d'ADN et de protéines.

Mais une méthode d'analyse aux possibilités aussi larges par exemple que la spectroscopie de masse et utilisée dans de très nombreux domaines ne peut prendre sa pleine efficacité qu'en association avec des connaissances fondamentales sur la réactivité chimique et des recherches physiques sur les processus d'ionisation nouveaux et de détection d'ions.

La relative jeunesse de ces recherches couplées à des outils aussi sophistiqués se traduit dans la plupart des laboratoires par l'absence d'une masse critique de chercheurs et d'ingénieurs "professionnels", ou simplement actifs dans l'instrumentation finalisée

par la biologie. Or, une masse critique de cette nature est le bain culturel indispensable pour aboutir à des innovations, être à la source de découvertes, voire, plus modestement, exploiter aux limites de leurs performances les outils existants. Sans volonté de la combler, l'absence d'une telle masse critique ne peut que s'autoentretenir.

De même les outils développés dans un cadre de recherche fondamentale peuvent trouver des applications pratiques, et éventuellement thérapeutiques, hors du cadre CNRS. L'exemple classique est celui de l'imagerie biomédicale (imagerie fonctionnelle) qui se développe par exemple autour des spectromètres RMN *in vivo*, des scanners X, des cyclotrons... Les problèmes d'interdisciplinarité et de masse critique sont ici semblables à ceux mentionnés précédemment.

## 3 - INSTRUMENTS DE RECHERCHE OU RECHERCHE D'INSTRUMENTS ?

En ce qui concerne les instruments de laboratoire, doit-on se résigner à réaliser, dix ans après les autres, des expériences normalisées avec la production standard de l'industrie américaine que les maigres budgets d'investissement des organismes de recherche ne permettent d'ailleurs plus d'acheter? Faut-il développer de tels instruments? La réponse encore une fois dépend sans doute des disciplines. Pour les raisons de masse critique évoquées ci-dessus, une machine presse-bouton peut représenter un progrès majeur en biologie. Mais sur le principe, existe-t-il une science de l'instrument que l'on pourrait développer, par exemple au moyen de laboratoires spécialisés, permettant de pallier ces insuffisances ?

Les exemples récents ont plutôt prouvé que l'instrumentation scientifique la plus performante est en général le résultat de recherches très avancées à caractère fondamentaliste. Ainsi le microscope à effet tunnel, qui sept ans après son invention est maintenant, avec ses différents successeurs, un outil appliqué à des domaines allant de l'étude

des surfaces à des essais de cartographie des molécules biologiques, a vu le jour dans un laboratoire industrie] consacré à la physique du solide et à l'électronique. Une telle invention aurait-elle pu se réaliser en France ? Au sein du CNRS ? La mise au point d'un tel instrument nécessite à la fois des recherches fondamentales et un état d'esprit tourné vers la notion d'applications pratiques de la part des chercheurs fondamentalistes. Outre que ce sens pratique est peu dans la nature de notre éducation où l'abstraction prime, il est aussi peu considéré par les instances d'évaluation. Ce genre mineur est censé être réservé aux techniciens et ingénieurs, alors qu'il implique un effort prolongé sur des années, de grandes compétences scientifiques et des moyens financiers non négligeables.

La reconnaissance *scientifique* d'équipes se consacrant à un travail instrumental doit donc être affirmée. La complexité des relations entre recherche et instruments rendra cependant illusoire la création de grandes structures instrumentales efficaces, du type "Laboratoire ou Institut des Instruments".

On peut prendre l'exemple des TGE qui ont, cette dernière décennie, fait progresser de façon significative l'astronomie, tels que les très grands télescopes des observatoires au sol (ESO, CFHT, IRAM, etc.), les instruments embarqués à bord de satellites ou de sondes, associés à des moyens de calcul très puissants. Pour la communauté des astronomes, les succès sont dus à une bonne coordination entre la division technique de l'INSU et les travaux complémentaires menés au sein de petites équipes, ce qui a permis une bonne exploitation des percées technologiques sous forme de prototypes.

#### 4 - COURSE AUX INSTRUMENTS ET RESTRUCTURATION DE LA RECHERCHE

L'importance accrue que la société attribue à la Science se traduit par une compétition s'apparentant parfois à la guerre économique, comme en

témoigne la récente polémique sur la découverte du virus du sida. Ces contraintes économiques se retrouvent de façon logique au niveau des instruments et de la technologie, car c'est souvent l'équipe la "mieux outillée" qui gagne.

Doit-on, dès lors que la compétitivité est de plus en plus le critère de jugement de la recherche, céder à la course aux appareillages manufacturés, coûteux, ultramodernes, pour qui, selon certains, la seule dépense de matière grise se réduit à la quête des millions de francs ? Cependant, si on n'y souscrit pas, peut-on affirmer que le seul génie des chercheurs suffira à les rendre compétitifs ?

De par leur incidence économique, les instruments apparaissent donc comme se trouvant au cœur d'une évolution très rapide du statut et des activités de la recherche, sinon de la mentalité des chercheurs. L'épreuve est rude, car l'image du scientifique individualiste et génial du XIX<sup>ème</sup> siècle est encore bien ancrée dans l'imaginaire populaire, et elle tente encore parfois aussi le chercheur, *même si le décideur n'y est plus sensible*. Le glissement s'est fait cependant progressivement vers la notion d'équipe. La complexité des méthodes d'analyse et le coût des instruments associés exigent maintenant une nouvelle mutation, celle que l'on peut appeler des réseaux, ou des fédérations, des pôles de compétence ou des sites....

## LE SAVOIR INSTRUMENTAL

Les compétences développées autour de l'instrumentation sont une partie importante du patrimoine du CNRS et contribuent à sa culture. De ce point de vue, il apparaît que les ingénieurs et techniciens constituent l'ossature instrumentale d'un laboratoire, et en particulier assurent le suivi et la mémoire de sa technologie. Néanmoins l'innovation instrumentale reste principalement un travail de recherche, sans pour autant que cela soit très reconnu. Se posent dès lors les problèmes de formation

et d'évaluation. Un paradoxe majeur est que, à un endroit on en a un autre, le CNRS possède dans la plupart des domaines les expertises instrumentales les plus pointues. La difficulté est de faire savoir que cette expertise existe et, dès lors, de la faire partager

## 1 - RECRUTEMENT, FORMATION ET MOTIVATION

La formation instrumentale se fait le plus souvent sur le tas, et l'existence de thèses à caractère très instrumental est un exemple du lien entre formation et recherche avancée. Le renouveau d'intérêt des jeunes pour la haute technologie et les expériences de pointe devrait favoriser les développements instrumentaux. Là aussi il faut nuancer, car dans nombre de disciplines il s'avère que la faible durée des thèses n'autorise pas de risquer un jeune sur un projet aussi aventureux que la construction d'un instrument. De plus, il a été fait jusqu'à présent peu de cas de ce genre de travaux dans les instances d'évaluation, et les commissions de recrutement ne favorisent pas par leur choix les chercheurs candidats au développement instrumental ou technologique. La tactique des laboratoires consiste dès lors à orienter les thèses plutôt vers l'exploitation à court terme d'une expérience déjà rodée.

La question du recrutement des jeunes se pose aussi pour le corps des ingénieurs et techniciens dont il est vital, pour le bon fonctionnement de l'instrumentation, qu'il soit maintenu en volume et en compétence. Un recrutement continu et important en volume permettrait de moduler les distributions vers les besoins nouveaux. Mais là, ce sont les salaires trop faibles et non concurrentiels avec le privé (malgré le droit de consultation) qui interdisent le recrutement d'ingénieurs de haut niveau. La population vieillissante est dès lors moins apte à participer à l'introduction de nouvelles technologies. Certes un programme de formation continue peut s'avérer efficace et permettre une reconversion, à l'aide aussi de promotions liées à un changement de laboratoire. Mais, outre que la frange de

la population sur laquelle une telle politique opérerait est limitée, il n'est pas rare alors que le laboratoire, dépouillé de son meilleur élément instrumental détenteur depuis de longues années d'une technologie particulière et unique, ne s'en remet pas.

En définitive, le succès d'un laboratoire est souvent lié au bon couplage direct entre chercheurs et personnels techniques de la réalisation. On peut illustrer cette importance avec l'exemple de la multiplicité des techniques exigées en physiologie animale (balises pour localisation, identification électronique, mesure de la dépense énergétique avec les isotopes pour l'étude des manchots) qu'un biologiste ne peut dominer à lui seul. Pour les disciplines d'observation de la terre, les équipes de techniciens de terrain ont un rôle crucial dans la maintenance des réseaux. Pour les chercheurs, comme pour les ingénieurs et les techniciens, seule une vigoureuse politique de promotion associée à une embauche coordonnée permettrait une remotivation vers les progrès de l'instrumentation.

## 2 - ETAT DES LIEUX ET DIFFUSION DU SAVOIR

Une des conséquences les plus curieuses de l'escalade vers les durées de vie plus en plus courtes des technologies est qu'il devient très difficile de réaliser un bilan de l'instrumentation. Ceci s'applique particulièrement aux mi-lourds. Il n'est qu'à voir les rapports sur ces instruments, réalisés il y a seulement trois ou quatre ans mais déjà dépassés. Or, comme nous l'avons mentionné, cette information est primordiale pour que tous les laboratoires, particulièrement ceux d'autres domaines, puissent avoir accès aux meilleures technologies.

La diffusion et la transmission de l'information sur les savoir-faire et les technologies sont faites de multiples manières. À côté des revues spécialisées, il existe quantité de supports papier de diffusion de l'information : les *lettres des* départements scienti-



fiques, le *Courrier du CNRS*, les *Images du CNRS*, des bulletins à diffusion plus restreinte et disciplinaire comme les courriers des Sociétés Savantes. La difficulté actuelle se situerait ici à un autre niveau : celui du choix, du tri d'une information surabondante et de qualité inégale, de l'évaluation du rapport qualité/prix, en quelque sorte,

Il est à la fois rassurant et inquiétant de noter que les percées interdisciplinaires autour d'une instrumentation sont le plus souvent le résultat du bouche à oreille et d'un réseau d'amitiés. Des solutions originales, reposant sur l'informatique, pourraient formaliser ce genre d'approche et fournir en temps réel l'état des lieux, instrumentations et expertises. Rien cependant ne remplaçant les contacts humains, les colloques interdisciplinaires peuvent aussi être un outil de diffusion non négligeable.

L'obstacle suivant réside dans la diffusion effective de cette expertise. Il est vrai que la formation permanente instrumentale a de plus en plus tendance à s'instaurer sur le terrain des laboratoires. Mais hormis une vision purement altruiste, que gagne un expérimentateur à donner ses secrets de fabrication ? La tendance bien connue serait plutôt de garder un *pouvoir* en restant incontournable. En un sens, il est logique que le chercheur qui a mis au point un instrument soit le premier à en recueillir les fruits. Continuer une telle politique sur le long terme pour des expériences de routine constitue un blocage à l'avancement de la science.

Là aussi, une politique de reconnaissance scientifique au niveau de l'évaluation des chercheurs et ITA, au niveau des promotions et des attributions de crédits, pourrait favoriser cette ouverture. Il est vrai que l'utilisateur doit aussi dans ce cas participer à cette reconnaissance scientifique en considérant cette participation comme une réelle collaboration scientifique et non comme l'utilisation systématique d'un service.

La circulation des hommes joue aussi un rôle important. Aux Etats-Unis, hormis la mobilité naturelle des chercheurs, un rôle de vecteur de l'information instrumentale est jouée par les "post-docs".

On connaît les réticences en France à l'utilisation de ces personnels hors-statuts. Il faut cependant noter que les réseaux mis en place par la CEE devraient faciliter ces mouvements d'un pays à l'autre

## LA GESTION AU SERVICE DE LA RECHERCHE

Il est manifeste que la révolution de la recherche, et en particulier le maintien des équipes dans la compétition internationale, implique la diffusion rapide d'appareillages de plus en plus sophistiqués et coûteux. Ceci est vérifié par exemple en biologie avec l'utilisation de la RMN, qui, il y a seulement cinq ans, était le fait de quelques groupes de pointe et qui est en passe de se généraliser. Comme en outre la technologie évolue de plus en plus rapidement, quel que soit le type d'instrument considéré, on observe un cycle de renouvellement (*"turn-over"*) de plus en plus rapide des outils et des technologies. Cette situation, caricaturale dans le domaine de l'informatique où un ordinateur est caduc en trois ans, touche de fait tous les secteurs, en particulier les mi-lourds. Trois ou quatre ans : telle est devenue la durée de vie des lasers les plus performants. Tous ces facteurs entraînent donc un important surcoût de l'équipement des laboratoires. On est arrivé à un point où un organisme comme le CNRS n'a plus les capacités de suivre.

### 1 - LE CAS DES MI-LOURDS

La gestion des mi-lourds est actuellement un des problèmes les plus critiques. Les demandes sont sans commune mesure avec les possibilités (de l'ordre de 20 % des demandes). La fraction du budget que les départements scientifiques sont actuellement en mesure de consacrer aux mi-lourds frise le ridicule.

Cette situation est particulièrement grave, car les mi-lourds sont un moyen d'orientation scientifique, et la recherche en France souffre de l'absence d'investissements lourds dans les dernières années. Elle risque donc de prendre un retard important dans divers domaines.

En dehors de l'urgence de la situation actuelle, le coût grandissant des mi-lourds et la rapidité avec laquelle ils deviennent obsolètes conduisent automatiquement à des choix. Il faut donc trouver de nouvelles méthodes de partenariat, développer de nouvelles façons de travailler. On ne peut plus attribuer les mi-lourds sur le seul critère de qualité, mais il faut tenir compte de leur utilisation. On ne peut plus répartir par sous-discipline. Là aussi, pouvoir se baser sur l'existant - donc avoir des inventaires par type d'instruments - serait utile.

## **2 - LA QUESTION DES FINANCEMENTS EXTÉRIEURS**

Les organismes n'étant plus en mesure de satisfaire les besoins des laboratoires en instrumentation performante, les sources possibles de financement extérieur prennent une importance grandissante, et ce avec tous les avantages et tous les risques que ce genre de situation peut comporter.

Parmi les sources de financement extérieur qui jouent un rôle grandissant, on peut citer les contrats de plan état-région, les contrats avec l'industrie, les associations caritatives. On peut noter que l'absence de Financement par la région Ile-de-France pénalise fortement les progrès de l'instrumentation dans cette région.

## **3 - GARDER LA PRIORITÉ AUX CRITERES SCIENTIFIQUES**

Devant cette situation, le CNRS, s'il veut éviter le saupoudrage - méthode de financement que Ton sait particulièrement inefficace - ou les choix dras-

tiques - qui ne peuvent être que douloureux et injustes -, se trouve de plus en plus conduit à la fois à une politique de concertation inter-laboratoires et à une politique de partenariat inter-organismes.

La concertation inter-laboratoires peut amener à pratiquer des politiques de site, à optimiser les coûts ultérieurs de fonctionnement, de maintenance, les besoins en personnel, à obtenir de meilleures conditions de marchés. L'association avec d'autres sources de financement - avec les autres organismes (CEA, INSERM...), les Universités, les Ministères, avec des partenaires industriels, et maintenant avec les Régions et enfin avec l'Europe - est de plus en plus le passage obligé pour acquérir des instruments nécessaires. Cette dernière voie, seule politique raisonnable, suppose cependant une synchronisation minimale entre les différentes instances. Les TGE ont déjà cette dimension. Dans d'autres domaines, l'importance et la complexité des instruments poussent à cette évolution. Ainsi, dans le domaine de la physique nucléaire, l'importance des instruments (accélérateurs, détecteurs, moyens informatiques) conduit à évoluer vers la définition de programmes à l'échelle européenne. En astronomie, l'ESO, le CFHT et l'IRAM ont permis une meilleure cohésion des communautés scientifiques concernées en les dotant d'instruments performants. En biologie, cette dimension européenne ou internationale se retrouve déjà pour les banques de données de séquences. Le danger dans cette course à l'efficacité peut être l'oubli des motivations scientifiques.

## **4 - LES EFFETS PERVERS**

La recherche de financements extérieurs est souvent laissée à la charge des laboratoires demandeurs. De ce fait, et bien qu'il soit en principe partiellement déchargé de la gestion du personnel, le Directeur de Laboratoire devient de plus en plus un gestionnaire. Tel un chef d'entreprise, il est de façon permanente en quête de crédits. Il peut aussi être tenté de confier cette quête à des professionnels de la gestion, ignorants des spécificités de la

recherche. Ces dérives possibles du rôle de responsable d'équipe de recherche sont porteuses de danger. Elles risquent effectivement de donner la primauté aux objectifs de gestion et de rendement, alors que les orientations dans tout laboratoire du CNRS doivent avant tout être fonction de critères scientifiques. On sait les ravages que l'oubli des critères scientifiques et de l'éthique au profit du rendement ont provoqués dans des domaines voisins.

Un deuxième type de péril réside dans la tentation du dogmatisme et l'établissement de règles draconiennes et systématiques. Ceci pourrait se faire sous forme de règlements, de conseils scientifiques d'instruments, de regroupements forcés, bref d'une nouvelle strate de décision avec le risque majeur d'étouffer la spontanéité et l'esprit d'innovation des petites équipes. Là encore, il faut se garder d'appliquer systématiquement des schémas qui semblent fonctionner dans des structures de type entreprise.

Un troisième danger, sans doute le plus grave, est lié au pouvoir de l'argent. Si le financement des instruments provient de sources non scientifiques, qui sera à terme en mesure de garantir son utilisation à des fins scientifiques ?

## **L'ORGANISATION DE LA RECHERCHE : LES RÉSEAUX DE COMPÉTENCE**

En aval de la création, la sophistication croissante de l'instrumentation pose de plus en plus des problèmes de compétences et de taille critique au niveau de l'utilisation. Ces difficultés sont présentes partout, mais de façon manifeste en chimie et biologie structurale, où il est admis que la même personne ne peut à la fois maîtriser toutes les étapes requises depuis la caractérisation du gène, son

expression, la purification des macromolécules, jusqu'à l'étude des relations structure-fonction-activité à partir de l'instrumentation la plus sophistiquée (qu'il s'agisse de mi-lourds de laboratoire ou de montages auprès des TGE).

Cette situation met en évidence l'importance, dans cette communauté, de la diversification des compétences. La question est alors souvent posée : est-il pertinent de rassembler, dans un seul laboratoire ou au niveau d'un même campus, des approches pluridisciplinaires et/ou de créer des pôles d'excellence par techniques, qui seraient chargés d'organiser l'accueil des autres utilisateurs ou encore de créer des centres chargés du développement et de la diffusion de l'instrumentation,

la réponse n'est ni triviale ni, vraisemblablement, unique pour toutes les disciplines. Ainsi a-t-on, par exemple, proposé des structures de type "projet" visant à réunir, de façon fonctionnellement efficace et limitée dans le temps, les compétences humaines nécessaires au développement d'un nouvel instrument. Comme éléments de réflexion, et en restant dans l'exemple précédent, on peut retenir que l'expérience montre que les échanges ne fonctionnent correctement qu'à partir d'un minimum de langage commun. Dans la situation idéale, le spécialiste en instrumentation est au fait des problèmes biologiques, cependant que le biologiste comprend les grandes étapes du déroulement de l'expérience, et ils sont tous deux d'accord sur l'importance de faire l'expérience et la manière de poursuivre la collaboration. Pour en arriver là, on risque d'être confrontés à de redoutables problèmes de nature différente : de formation interdisciplinaire d'abord, d'organisation de l'accueil et du choix des expériences à réaliser auprès des instruments ensuite, et de reconnaissance par la communauté du rôle de cet accueil enfin. Trop souvent, la communauté des utilisateurs croit avoir besoin d'un service alors qu'elle a besoin de spécialistes de haut niveau, capables de définir les protocoles d'expériences, de surmonter les difficultés imprévues, et au besoin, de développer de nouvelles performances instrumentales. Trop souvent encore, ce rôle d'accueil joué par le spécialiste n'est pas perçu à sa juste



valeur, que ce soit par l'utilisateur ou par les commissions du CNRS, et ceux qui le pratiquent sont encore trop souvent pénalisés.

Ces difficultés peuvent sans doute être résolues dans le cadre de ce que l'on pourrait appeler au sens large des *"réseaux de compétence"*, c'est-à-dire des ensembles suffisamment larges pour associer plusieurs spécificités, sans pour cela vouloir en fixer trop vite les contours, afin de conserver une souplesse indispensable. La recherche actuelle nous en fournit divers exemples.

Les TGE comme ILL, le ILB et LURE ont été des points de départ de réseaux de compétence. Les communautés peu à peu de développer seules les outils nécessaires y ont trouvé aide et savoir-faire. Si certains déplorent parfois un manque de souplesse de tels ensembles, ces TGE ont, en revanche, introduit un nouveau rapport à l'instrumentation avec les notions d'accueil, d'efficacité, de professionnalisme et de rentabilité, qui n'étaient et ne sont toujours pas monnaie courante dans tous les laboratoires.

L'un des objectifs majeurs du programme interdisciplinaire IMABIO (Ingénierie des macromolécules biologiques) est de mettre à la disposition de la communauté scientifique des pôles géographiquement identifiés, avec les compétences complémentaires et les moyens correspondants en gros équipements pour l'étude des relations structure-fonction des macromolécules biologiques. IMABIO mène sa politique en concertation avec quatre départements (SPM, SPI, SC, SDV) et en collaboration avec les partenaires institutionnels de l'organisme. Il s'agit donc ici de structuration sur site en réseaux de compétence, dans un domaine scientifique ciblé.

Dans un contexte plus large, une réflexion est en cours au CNRS visant à regrouper des laboratoires au sein de structures plus larges : les Instituts Fédératifs de Recherche. De telles structures répondent à un souci d'efficacité tant sur les problèmes scientifiques que sur les problèmes de gestion. Elles espèrent concilier deux exigences opposées : le besoin d'autonomie au niveau de la direction des la-

boratoires et le besoin d'une coordination locale sur des ensembles suffisamment importants.

Enfin, la structure en GDR, lieu de rencontre et d'échange, peut servir à organiser des réseaux, sur site ou à des échelles plus larges. Plusieurs GDR rassemblent actuellement des spécialistes d'un domaine donné à l'échelon national.

Le CNRS dispose donc actuellement de différentes structures pour favoriser le développement de réseaux de compétence, dont certaines très récentes. La question ici serait donc davantage de les faire fonctionner ou d'améliorer le fonctionnement des structures existantes. On rejoint naturellement les problèmes de gestion.

## RELATIONS AVEC LES INDUSTRIELS DE L'INSTRUMENTATION

La continuité entre la conception d'un instrument "prototype" au sein d'un laboratoire et l'instrument standard disponible commercialement transite à travers l'interface avec l'industrie de l'instrumentation. Cette frontière est difficile à gérer car les deux entités poursuivent des objectifs apparemment différents. Or elles vivent en symbiose et ne peuvent se passer l'une de l'autre, la mauvaise santé de l'une rejaillissant sur l'autre et vice-versa. Ceci crée un rapport à double sens client-vendeur qui ne peut fonctionner correctement qu'à partir de relations initiales de confiance.

On peut prendre comme exemple le cas des lasers. La physique en est très riche, depuis des problèmes de mécanique quantique, de la physique atomique et moléculaire jusqu'à la science des matériaux. Cependant les lasers dépassent largement ce cadre et se retrouvent composants, le plus souvent stratégiques, d'une grande partie de l'instrumentation scientifique. A partir de leurs relations

avec l'industrie, on peut faire quelques constatations. Ce n'est pas par hasard que les découvertes les plus importantes sur les lasers ont été faites pendant les années 60-85 dans les riches laboratoires de la Bell Téléphone, alors "temple" de recherche fondamentale et appliquée dans nombre de secteurs sensibles. Réciproquement, nombre d'avancées scientifiques, plus ciblées, se sont réalisées aux Etats-Unis grâce à la participation d'un industriel se concrétisant par exemple par un prêt de matériel. Une fois que la technique et l'appareillage sont maîtrisés, l'industriel peut l'incorporer à son catalogue et le laboratoire y gagner, par exemple, à court terme des matériels et des tarifs préférentiels. Outre le domaine des lasers, cette pratique n'existe en France que dans quelques secteurs. La spectrométrie Raman, avec la création d'un GIF "*Instrumentation et Spectrométrie*" de 1984 à 1989 a été un exemple de réussite, qui se prolonge actuellement justement par un type de collaboration basé surtout sur le prêt de matériels que les chercheurs n'auraient autrement aucune possibilité de tester, étant donné leur coût. Il n'en va pas de même en spectrométrie de masse ou en mécanique où le coût et la complexité des instruments n'ont pas permis encore cette pratique.

D'un autre côté, il est normal qu'un organisme tel que le CNRS veuille valoriser ses recherches et défendre les intérêts des équipes. De là sont apparus il y a une ou deux décennies des organismes administratifs à structure lourde telle que l'ANVAR, qui ne résout pas tous les problèmes. La spécificité de l'industrie de l'instrumentation est de reposer sur des PME/PMI, qui, si elles sont très génératrices d'innovation, ont très peu de fonds propres et une marge bénéficiaire de l'ordre de 5 %, du moins pour celles qui en ont. Il est donc illusoire d'appliquer à ces industriels des règles drastiques d'investissement initial de capital, ainsi qu'on pourrait le faire à un industriel à qui le CNRS transfère un procédé de fabrication. De plus, la rapidité de mise sur le marché est primordiale, la durée de vie d'un équipement dans un domaine de pointe pouvant être de deux ans seulement (cf. le développement des lasers impulsifs et femtoseconde en particulier). Toute

structure administrative lourde, donc lente, ne peut que bloquer le processus. D'autres difficultés sont liées à la taille des marchés. À cet égard, il faudrait sans doute commencer à penser européen.

Un apprentissage des relations laboratoires - industriels de l'instrumentation est donc nécessaire à tous les niveaux, du chercheur à la direction du laboratoire et de l'organisme, et évidemment de la part de l'industriel aussi. La première interface, la plus importante, est sans doute un esprit de *confiance* entre le chercheur qui a la volonté de valoriser un prototype pour le faire passer à l'état de maquette, et l'industriel intéressé par ces recherches.

La première difficulté est qu'en général le prototype que le chercheur a mis au point est très loin des conditions exigées d'une maquette industrialisable en termes de coûts, de fiabilité, de simplicité d'emploi, etc., sans parler de marché. Le deuxième point de friction réside dans l'ambiguïté de cette démarche qui inverse le sens du flux acheteur - vendeur. Le chercheur peut être tenté de s'alimenter au dépens du secteur public - ce travers se résorbant, paraît-il, depuis une dizaine d'années -, ou l'industriel être tenté de ne pas rétribuer à leur juste valeur les avancées du chercheur. La situation est différente aux Etats-Unis où des chercheurs universitaires ou de laboratoires nationaux créent et investissent dans des sociétés d'instrumentation. En France, la notion de consultant donne une incitation minimale, mais indispensable, tout en permettant de rester dans le cadre du statut du CNRS. Il est cependant probable que cette incitation ne soit pas suffisante en l'état actuel, vu la prise de risque.

Restant dans cette interaction, il faut noter que l'image de marque du CNRS, même si elle s'est considérablement améliorée, n'est toujours pas des meilleures auprès des industriels. En effet, outre les problèmes mentionnés plus haut, ils considèrent que les gestionnaires de la recherche, cherchant à rentabiliser leurs crédits au mieux, les mettent en concurrence, sur un pied d'égalité ou

même avec un *a priori* défavorable pour eux, avec l'industrie étrangère. Ce mécanisme ne permet pas à l'industrie nationale d'obtenir un marché suffisant justifiant l'investissement de recherche et de développement élevé, et donc de devenir concurrentielle. Il faut cependant reconnaître que le seul marché français est trop restreint, et qu'une politique instrumentale doit se faire maintenant au niveau de l'Europe, avec peut-être une concurrence entre Européens, associée à une préférence affichée pour ces matériels européens.

## RECOMMANDATIONS

Pour la première fois le CNRS a jugé opportun de demander un rapport global sur la problématique des outils de la recherche, des instruments et de la technologie. Cette vision transdisciplinaire de l'instrumentation manifeste un nouvel état d'esprit et une reconnaissance du rôle fondamental des instruments dans le progrès de la recherche et de la connaissance. Elle manifeste aussi un certain désarroi devant la sophistication croissante qui entraîne une augmentation vertigineuse du coût des appareillages. Dès lors, toute politique scientifique se doit d'inclure une politique cohérente de l'instrumentation, qui prenne en compte le besoin d'une action vigoureuse de financement, par exemple sous forme d'actions incitatives. Une telle politique devrait d'abord se baser sur une information adéquate, c'est-à-dire un *état des lieux en temps réel* utilisable par tous - et qui reste à faire -, et une action de *formation*. Elle implique ensuite une volonté de *valorisation* du domaine de l'instrumentation. Elle doit s'appuyer enfin sur une *évolution des structures de recherche*, se caractérisant par une concertation et un partenariat accrus, dans un souci à la fois d'efficacité et de gestion cohérente, débouchant vers une logique pluridisciplinaire d'importation et d'exportation de disciplines à disciplines incluant aussi les industriels.

### 1 - POUR UN BILAN GLOBAL DES OUTILS DE LA RECHERCHE

Les instruments mentionnés dans ce rapport représentent un échantillonnage des instruments de recherche utilisés par les laboratoires du CNRS, toutes disciplines confondues. Il est cependant évident que ce rapport ne permettait pas d'en dresser une liste complète - celle-ci n'aurait d'ailleurs pas eu grand intérêt pour cette première approche multifacette. Il s'agit ici d'une réflexion sur les diverses problématiques liées aux instruments, les diverses approches qui devraient, par la suite, être approfondies.

Si le CNRS veut pouvoir se livrer à une réflexion de fond sur les instruments (leur rôle, leur gestion, ...) et avancer une politique de l'instrumentation cohérente, homogène, efficace, la première étape en devrait être un bilan complet de ce qui existe. Comme souligné auparavant, il s'agit là d'une tâche très difficile si on veut cet état des lieux facilement utilisable par une large communauté. Des bilans partiels existent, mais il conviendrait maintenant de se doter d'une vue d'ensemble précise. Elle serait la garantie d'une politique cohérente et d'une synchronisation entre les divers décideurs ou organismes liés au CNRS, et permettrait une coordination entre secteurs de recherche, et, chose plus originale encore, entre régions,

Un tel bilan est un préalable à la définition des modalités de choix de prospective pour l'implantation des instruments.

### 2 - POUR UNE VALORISATION DE LA RECHERCHE INSTRUMENTALE

Pour qu'une politique de l'instrumentation soit possible, il faut que le personnel du CNRS, à tous ses niveaux, soit conscient de l'importance de ses outils. Mais cette conscience ne suffit pas. La valorisation du travail instrumental et du développement d'outils nouveaux doit devenir une réalité concrète et non plus un enjeu purement langagier. Cela si-



gnifie que la valorisation devrait se traduire dans les carrières du personnel, chercheurs comme ITA.

Des opérations de formation pourraient être des aides à la valorisation du travail instrumental. Il y a déjà des efforts en ce sens au CNRS : les directeurs de laboratoires sont invités à proposer des thèmes de formation - ceux dont le personnel a besoin, ceux qu'ils peuvent offrir. De telles actions pourraient être largement multipliées. Elles devraient, dans ce cas, être soigneusement coordonnées afin d'éviter les doublons inutiles et coûteux.

Par ailleurs un bon développement des instruments suppose une circulation de l'information à leur propos. Trop d'informations sont encore tenues pour "propriété privée" des laboratoires. Les instruments ne doivent pas être des biens immobilisés comme des objets dans un bas de laine, mais des investissements producteurs de richesses,

### 3 - POUR UNE OPTIMISATION DES RESSOURCES

La gestion suppose une bonne connaissance des coûts tant à l'achat qu'à l'usage, et des coûts des services annexes obligatoirement liés aux instruments. En particulier, il est nécessaire de prévoir les moyens de fonctionnement en crédits et en personnel pour les équipements acquis sur contrat externe. Il conviendrait que les utilisateurs sachent dresser un bilan économique global de leurs instruments tenant compte de tous les facteurs.

La gestion actuelle des instruments, à partir d'un certain niveau de coût ou de complexité, implique de plus en plus une concertation entre laboratoires et un partenariat inter-organismes. Il serait donc souhaitable que le CNRS aide ses laboratoires à établir et à structurer ces relations. Le développement de pôles, d'instituts fédératifs, de GDR, ou autres, irait dans ce sens.

Dans le même ordre d'idée, afin de coordonner intérêts scientifiques et optimisation économique, des réseaux de compétence devraient être favorisés. Des exemples de GDR instrumentaux régionaux, tel le regroupement des lasers de la région Rhône-Alpes, ont démontré leur utilité à la fois pour l'optimisation des ressources, des équipements et des compétences, et comme interlocuteurs responsables vis-à-vis des industriels et des collectivités. H. serait donc souhaitable de développer de telles initiatives, peut-être pilotées par les délégations régionales, même si l'évaluation doit rester nationale.

La gestion met aussi en jeu les relations du CNRS avec l'entreprise privée, avec laquelle il serait souhaitable d'établir un véritable partenariat. Actuellement on constate que celles-ci sont souvent difficiles, non pas faute de "client" mais soit faute de personne] capable de répondre rapidement et de façon responsable à la demande, soit faute de respect des délais usuels à l'industrie par les administrations. Plus que d'un problème matériel, il s'agit là d'un état d'esprit, d'une mentalité, d'habitudes qui sont difficiles à changer.

Un schéma à favoriser pourrait être celui d'une collaboration suivie entre chercheurs du laboratoire public et de l'entreprise : le chercheur définissant les nouveaux besoins, l'entreprise réalisant l'appareil, le chercheur le testant et, par ses publications et communications, participant à sa promotion. Une réflexion serait à mener pour optimiser le coût et l'efficacité de ce partenariat.

### 4 - PEUT-ON CONCLURE SUR L'INTERDISCIPLINARITÉ ?

L'ensemble des propositions ci-dessus (bilan des instruments par secteurs et par régions, formation et circulation des personnels, diffusion des informations sur les instruments, bilan de la gestion des instruments, mise en place de réseaux de compétence) visent toutes à *une optimisation* de la répartition et de l'utilisation des instruments.

Cependant bien que la question de l'*interdisciplinarité* n'ait été abordée explicitement que par le biais de l'importation et de l'exportation d'instruments de disciplines à disciplines, elle reste en toile de fond sur toute cette réflexion,

Idéalement les propositions faites devraient permettre son émergence et son développement afin de promouvoir les idées nouvelles qui feront l'instrumentation et donc la recherche du futur. Concrètement et plus modestement elle devrait favoriser *la compétitivité, la qualité et l'efficacité de la recherche*.

**Anne-Marie Loffler-Laurian**

*Présidente du groupe 23*

*avec la collaboration de*

*Arnold Migus*

*Annette Tardieu*

*Guy Michelat*

**Annexe : liste des Grands instruments scientifiques** (*dont une partie seulement est financée directement par le CNRS*)

### **Physique lourde**

- Physique des particules élémentaires : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) à Genève.

- Physique nucléaire : le Grand Accélérateur National à Ions Lourds (GANIL), à Caen, le Laboratoire National Saturne à Saclay, le projet d'Accélérateur Européen à Electrons,

- Fusion Contrôlée : le Tokamak Tore-Supr à Cadarache, le Tokamak Européen JET à Culham (UK),

### **Sciences de l'Univers**

- Astronomie : l'Observatoire Européen dans l'Hémisphère Austral (ESO) à La Silla (Chili), le Télescope Canada-France-Hawaï (CFHT) à Hawaï (Etats-Unis), l'institut de Radioastronomie Millimétrique (QAM) à Grenoble (installations dans la Sierra Nevada, Espagne, et sur le plateau de Bure, France), les Satellites d'astrophysique Hipparcos et ISO (ESA), le Télescope embarqué SIGMA (France-URSS), les missions SOHO et CLUSTER (ESA) et la détection d'ondes gravitationnelles (VIRGO),

- Planétologie, Océanologie et Sciences de la Terre ; les sondes d'exploration planétaire MARS 94 (France-URSS), la sonde CASSINI (ESA-Etats-Unis), les grands navires de la flotte de l'IFREMER et des TAAF, avec leurs équipements scientifiques, le programme des forages océaniques ODP (*Océan Drilling Program*), le satellite d'océanographie spatiale Topex-Poséidon (France-Etats-Unis), les satellites de télédétection ERS-1 et ERS-2 (ESA), le programme GPF (Géologie Profonde de la France).

### **Grands instruments de caractérisation et d'étude de la matière condensée**

L'Institut Laue-Langevin (ILL) à Grenoble, le Laboratoire Léon Brillouin (et le réacteur Orphée) à Saclay, l'Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron (ESRF) à Grenoble, le Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE) à Orsay, la plate-forme spatiale EURECA (ESA),

### **Biologie**

Le Laboratoire Européen de Biologie Moléculaire (EMBL) à Heidelberg, Grenoble et Hambourg,

### **Equipements interdisciplinaires**

Le programme de vols spatiaux habités de longue durée.

### **Grands Equipements Techniques ou Opérationnels**

Le système de satellites météorologiques METEOSAT, la soufflerie Transsonique Européenne ETW à Porz (RFA),

# ANNEXES



## ***Liste des participants*** ***aux travaux des 23 groupes thématiques***

### **01 - LES MATHEMATIQUES ET LEURS INTERACTIONS**

Monsieur Laurent BAULIEU  
Monsieur Jean-Pierre DESCLES  
Monsieur Roger GUESNERIE  
Monsieur Gérard IOOSS  
Monsieur Jean-Pierre JOUANNAUD  
Monsieur Daniel KROB  
Monsieur André LANNES  
Monsieur Jacques LASKAR  
Monsieur Jean LATERRASSE  
Monsieur Jean-Paul LAUMOND  
Monsieur Bernard LEGRAS  
Monsieur Yves MEYER

Monsieur Jacques MORET-BAILLY  
Monsieur Bernard PRUM  
Monsieur André RASSAT  
Monsieur Dominique RICHARD  
Madame Evelyne RICHARD PINTY  
Monsieur Jean-François SADOCC  
Monsieur Denis SERRE  
Monsieur Raymond STORA  
Monsieur Pierre SUQUET  
Monsieur Richard TOMASSONNE  
Monsieur Bernard VICTORRI

### **02 - SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION**

Monsieur Franck AURIAC  
Monsieur Jeaa-Claude BERNIER  
Monsieur jacques BERNUSSON  
Monsieur Yves BLANCHARD  
Monsieur Jean BOURDIN  
Monsieur Georges BRAM  
Monsieur Philippe BRETON  
Monsieur Pierre CHAVEL  
Monsieur Jean-Paul DEVILLE  
Monsieur Daniel EGRET  
Monsieur GARDA

Monsieur Claude JARD  
Monsieur Philippe JORRAND  
Monsieur Jean-Louis LACOMBE  
Monsieur Jean-Louis LE GOUET  
Monsieur Humbert LESCA  
Madame Odile MACCHI  
Monsieur Guy MAZARE  
Monsieur Jean-François MESTRE  
Monsieur Patrice POGNAN  
Madame Janine ROGALSKI  
Monsieur Gilbert de TERSSAC

**03 - SCIENCES DE LA COGNITION ET DE LA COMMUNICATION**

Madame Marie-Françoise BELIN  
Monsieur Jean BIGEON  
Madame Michèle CASTELLENGO  
Monsieur Pierre CHARLES-DOMINIQUE  
Monsieur Michel DENIS  
Madame Danièle DUBOIS  
Monsieur Jacques DUBUCS  
Monsieur Jean-Yves GIRARD  
Monsieur Jean-Michel HOC  
Monsieur Yvan HUC  
Monsieur Jean-Marc JALLON  
Monsieur Bernard KERDELHUE  
Monsieur Yvon LE MAHO  
Monsieur Jean-Louis LE MOIGNE

Monsieur Joseph MARIANT  
Madame Claudine MASSON  
Monsieur Marc MEZARD  
Monsieur Jean-Marc MONTEIL  
Monsieur jean-Marie PIERREL  
Monsieur Henri PRADE  
Monsieur Claude PUECH  
Madame Marie-Claire ROBIC  
Monsieur Christian ROLANDO  
Madame Nicole SINDZINGRE  
Monsieur Simon THORPE  
Monsieur Gérard TOULOUSE  
Monsieur Georges VIGNAUX

**04 - UNIVERS, NOYAUX, PARTICULES**

Monsieur Jacques ARVIEUX  
Monsieur Daniel BENNEQUIN  
Monsieur Grégorio BERNARDI  
Madame Marie-Anne BOUCHIAT  
Monsieur Alain BOUQUET  
Monsieur Michel DAVIER  
Monsieur Jean-Marc DENIS

Monsieur Claude FROIDEVAUX  
Monsieur Florent HAAS  
Monsieur Serge JULLIAN  
Monsieur Gary MAMON  
Monsieur Alonso-Luis OLIVER  
Monsieur Jean SCHNEIDER  
Monsieur Dominique VAUTHERIN

**05 - PLANETOLOGIE COMPAREE ET SYSTEME SOLAIRE**

Monsieur Michel BLANC  
Monsieur Jean-Marie FLAUD  
Monsieur Daniel GAUTIER  
Monsieur Yves LANGEVIN  
Monsieur Gérard MANHES

Monsieur Patrick PINET  
Monsieur François RAULIN  
Monsieur Christophe SOTTIN  
Monsieur Olivier TALAGRAND  
Monsieur Jean-Paul VILLAIN

**06 - ORDRE ET COMPLEXITÉ DANS LA MATIÈRE**

Monsieur Gérald BASTARD  
Monsieur Jean BELLISSARD

Monsieur Bernard BIGOT  
Monsieur Pierre CHAVEL

Monsieur Michel CHE  
Monsieur Alain CHENCINER  
Madame Thérèse CHEVREAU  
Monsieur Jean-Claude COLSON  
Monsieur Philippe DAVY  
Monsieur Georges DURAND  
Madame Edith FALGARONE  
Monsieur Claude FROEHLY

Madame Maryvonne HERVIEU  
Monsieur LESIEUR  
Monsieur Maurice LOMBARDI  
Monsieur Jacques MALTHETE  
Monsieur Jacques PELOUS  
Monsieur Yvan SEGUI  
Monsieur Jean-François SYGNET  
Monsieur M. THELLIER

## **07 - ECHELLE MESOSCOPIQUE DE LA MATIERE**

Monsieur B. BARBARA  
Monsieur Jean-Marie BASSET  
Monsieur Thierry BRETHEAU  
Monsieur Bernard CHAMPAGNON  
Monsieur Camille COHEN  
Monsieur François DAVID  
Madame Mireille DESCE-BLANCHARD  
Monsieur Michel FROMENT  
Monsieur Jean-Marie GEORGES

Monsieur C. GUET  
Monsieur P. LAVALLARD  
Monsieur Alain LEGER  
Monsieur Didier LIPPENS  
Monsieur Dominique MAILLY  
Monsieur B. PANNETIER  
Monsieur Jacques PROST  
Monsieur Georges ROSENBLATT  
Monsieur R. YAVARI

## **08 - PHYSIQUE ET CHIMIE DU SOUDE**

Monsieur Bernard BIGOT  
Monsieur Jean ETOURNEAU  
Monsieur Jean GALY  
Monsieur Maurice GERL  
Monsieur François GUYOT  
Monsieur Denis JEROME

Madame Martine LAGACHE  
Monsieur Y. LE BEYEC  
Monsieur Louis LE SERGENT  
d'HENDECOURT  
Monsieur Michel POUCHARD  
Monsieur P. VIKTOROVITCH

## **09 - OPTIQUE ET ELECTRONIQUE**

Monsieur François BIRABEN  
Monsieur Jean BRETAGNE  
Monsieur Ross BROWN  
Monsieur André COLLET  
Monsieur Pierre DELPIERRE  
Monsieur Arnaud ETCHEBERRY  
Monsieur Jean-Pierre GOEDGEBUER  
Monsieur Jean-Bernard GRUN

Monsieur Georges KAMARINOS  
Monsieur Laurent KOEHLIN  
Monsieur Jean-Pierre LAUNAY  
Madame Suzanne LAVAL  
Monsieur Augustin MARTINEZ  
Monsieur Michel ORRIT  
Madame Nicole OSTROWSKI  
Monsieur Adel RAZEK



Monsieur Jean-Louis ROBERT  
Monsieur Georges SALMER  
Monsieur Frédéric STOECKEL

Monsieur André TARDIEU  
Monsieur Bertrand THEYS  
Monsieur Laurent VIGROUX

## **10 - MATERIAUX SPECIFIQUES POUR DES FONCTIONS NOUVELLES OU COMPLEXES**

Monsieur R. ADDE  
Monsieur Marcel BERVEILLER  
Monsieur Philippe BOCH  
Monsieur Alain BRENAC  
Monsieur Michel BRUNEAU  
Monsieur Jean-Pierre BRUNELLE  
Monsieur Jean-Pierre CHABRERIE  
Monsieur P. CLECHET  
Monsieur Noël CORON  
Monsieur Patrick DUBOST  
Monsieur Gilbert FANTOZZI  
Monsieur Michel FONTANILLE  
Monsieur Francis GARNIER  
Monsieur Arnand GEORGE  
Madame Alix GICQUEL

Monsieur Pierre GUILMIN  
Monsieur Pierre-François GOBIN  
Monsieur Yves LAURENT  
Monsieur Michel LEBEAU  
Madame Michèle LEDUC  
Monsieur Roland LEVY  
Monsieur Joël MOREAU  
Monsieur Antonio MUNOZ YAGUE  
Monsieur Patrick NETTER  
Monsieur P. PINARD  
Monsieur J.L. ROBERT  
Monsieur Laurent SEDEL  
Madame Marie-Luce THEYE  
Monsieur Bernard THIBAUT  
Monsieur Igor TKATCHENKO

## **11 - LA CHIMIE : DE LA REACTION SIMPLE A LA SYNTHÈSE D'ÉDIFICES ÉLABORÉS**

Monsieur Christian AUCLAIR  
Monsieur Robert BLOCH  
Monsieur Jacques GORE  
Monsieur Alfred GREINER  
Monsieur Jacques LAVAL  
Monsieur Jean-Pierre MAJORAI  
Monsieur Michel PFEFFER

Monsieur Alain RAMER  
Madame Isabelle RICO  
Madame Evelyne ROUEFF  
Madame Marie-Françoise RUASSE  
Monsieur Jean-Pierre SAUVAGE  
Monsieur Michel TOURNOUX  
Monsieur Jacques VIGUE

## **12 - GENIES, PROCEDES : TECHNIQUES, IMPACTS, ECONOMIE**

Monsieur Denis AUBRY  
Monsieur Robert AZERAD  
Monsieur Bernard BARRAQUE  
Madame Geneviève BERGER

Monsieur Jean-René BERNARD  
Monsieur Marcel BERVEILLER  
Monsieur BOUSQUET  
Monsieur Pierre CLASTRES

Monsieur Claude GAILLARDIN  
Monsieur Marc HITTINGER  
Monsieur Jacques-Henri JACOT  
Monsieur Jean JENCK  
Monsieur Bernard KLOAREG  
Monsieur Jean-Paul LALLEMAND  
Monsieur Bernard LANGLOIS  
Monsieur Michel LEBOUCHE  
Monsieur Jean-Pierre LEFEBVRE

Monsieur Henri MARTINOT  
Monsieur Michel RAOUS  
Madame Janine ROGALSKI  
Monsieur Victor SANCHEZ  
Madame Colette SCHMITT  
Monsieur Laurent SEDEL  
Monsieur André SIMON  
Monsieur Charles SOL  
Monsieur Daniel TONDEUR

### **13 - LES ENERGIES DU FUTUR : RESSOURCES, MAITRISE, TECHNOLOGIES, ÉCONOMIES, IMPACTS**

Monsieur Pierre ALBRECHT  
Monsieur Bernard ASTIE  
Monsieur Marcel BARBERO  
Madame Michèle BREYSSE  
Monsieur Michel CATHONNET  
Monsieur EQUER  
Monsieur Edouard FABRE  
Monsieur Dominique FINON  
Monsieur Jean-Claude GRENET  
Monsieur D. GARDES

Monsieur Pierre JOULAIN  
Monsieur Marc LEMAIRE  
Monsieur P. MATHIS  
Monsieur Michel POUCHARD  
Monsieur RAYNAUD  
Monsieur Jacques RILLING  
Monsieur Mamoud SALEM  
Monsieur Jacques TELLIER  
Monsieur Paul TREHEN  
Monsieur J. VIDAL

### **14 - LA TERRE : DYNAMIQUE ET CHANGEMENT GLOBAL**

Monsieur Jean-Loup BERTAUX  
Monsieur François BLASCO  
Monsieur Louis CABIOCH  
Monsieur Daniel CARIOLLE  
Monsieur Robert DELMAS  
Monsieur Bernard DUPRE  
Monsieur François-Xavier LE DIMET

Monsieur Henri de LUMLEY  
Monsieur Lucien MASBERNAT  
Monsieur Michel POUYLLAU  
Monsieur Yanick RICARD  
Monsieur Philippe ROQUEPLO  
Monsieur Pierre SABATIER  
Monsieur Paul TAPPONNIER

### **15 - MILIEUX, RESSOURCES, ECOSYSTEMES, RISQUES**

Monsieur Pierre ALBRECHT  
Monsieur Bruno AMBROISE  
Monsieur Gérard ARDISSON  
Monsieur Marcel BARBERO

Monsieur Pierre-Yves BARD  
Monsieur Charles-François BOUDOURESQUES  
Monsieur Jacques BOULEGUE  
Monsieur Jean-Paul BRAVARD

Monsieur Michel BRUNEAU  
Monsieur Jean CASES  
Madame Michèle CASTELLENGO  
Monsieur Gérard DAIGNE  
Monsieur Robert DELORT  
Monsieur Francis DURST  
Monsieur François EWALD  
Madame Yannick HOPPILLARD  
Monsieur Michel HOURLADE  
Monsieur Jean-Claude JACQUESY  
Monsieur Alexandre KISS  
Monsieur Bertrand KRAFFT

Monsieur Pierre LEMONNIER  
Monsieur Robert LESCLAUX  
Monsieur Claude LION  
Monsieur Gilbert MAIRE  
Monsieur André MALAN  
Monsieur Lucien MASBERNAT  
Madame Nicole MATHIEU  
Monsieur B. MEUNIER  
Monsieur Michel PRIEUR  
Monsieur Gilles REVEL  
Monsieur François TOUTAIN  
Monsieur Paul TREHEN

## **16 - ARCHITECTURE ET DYNAMIQUE MOLECULAIRES, SYSTÈMES BIOLOGIQUES**

Monsieur Théo BLATZ  
Monsieur Richard BLIGNY  
Monsieur Michael CHANDLER  
Monsieur Laurent DIANOUX  
Monsieur Thomas GAREL  
Monsieur Jean-Pierre HUGOT  
Monsieur Gérard JAOUEN  
Monsieur Jean-Marc LATOUR  
Monsieur Jacques LAVAL  
Monsieur Jean-Claude MANI

Monsieur Raymond MIQUELIS  
Monsieur Henri ORLAND  
Monsieur Pierre PFEUTY  
Monsieur Jean-Louis PIERRE  
Monsieur Marius PTAK  
Monsieur François RAULIN  
Monsieur Georges ROMÉY  
Madame Jeannine YON-KAHN  
Monsieur Charles ZELWER

## **17 - EVOLUTION : DU GENOME AUX BIOSYSTEMES**

Monsieur Christian AUCLAIR  
Madame Claudine BERTHE-FRIEDBERG  
Monsieur Jean-François BRIAT  
Monsieur Auguste COMMEYRAS  
Madame Anne FLAMAND  
Madame Françoise FRIDLANSKI  
Madame Marie-Claude GAUDEL  
Madame Suzan de GOER DE HERVE  
Monsieur Daniel GOUJET  
Madame Marianne GRUNBERG MANAGO  
Monsieur Jean-Jacques HUBLIN  
Monsieur Jean-Pierre HUGOT

Monsieur Jean-Jacques JEAGER  
Monsieur Bertrand KRAFFT  
Monsieur Jacques LAVAL  
Monsieur Jean-Pierre LAVEINE  
Madame Marie-Paule LEFRANC  
Monsieur T. MIEG  
Monsieur Dino MORAS  
Monsieur Jean-Claude MOUNOLOU  
Madame Nicole PASTEUR  
Monsieur Florent SOUBRIER  
Monsieur Pascal TASSY  
Monsieur Bernard TEISSIER



## 18 - DE LA CELLULE AUX STRUCTURES INTEGREES DES ORGANISMES

Monsieur René BALLY  
Madame Marie-Jo BESSON  
Monsieur Christian BLEUX  
Monsieur Yves COMBARNOUS  
Monsieur Jean DELACHAMBRE  
Monsieur Jean-Marc JALLON  
Monsieur Bernard KERDELHUE  
Monsieur Armand LATTES

Monsieur André MALAN  
Monsieur Michel MONSIGNY  
Monsieur Jean-Louis PRIOUL  
Monsieur Raoul RANJEVA  
Monsieur Pedro SANTAMARIA  
Monsieur Daniel SCHERMAN  
Monsieur Jean-Didier VINCENT  
Monsieur Bruno WILL

## 19 - SANTE ET THERAPEUTIQUE

Monsieur J.P.ALARD  
Monsieur Jean d'ANGELO  
Monsieur Christian AUCLAIR  
Mademoiselle Isabelle BASZANGER  
Monsieur Laurent BAUD  
Monsieur Alain BIDEAU  
Madame C. BIGAND-BULLY  
Monsieur A.M. BOUDET  
Madame Anne CAMBON-THOMSEN  
Madame Silla CONSOLI  
Monsieur Louis DUBOUIS  
Monsieur Gérard DURU  
Monsieur Farid EL MASSAOIH  
Monsieur Jean-Marc ENGASSER  
Monsieur Alain EPELBON  
Madame Anne FAGOT-LARGEAULT  
Monsieur Olivier FAURE  
Monsieur Frédéric FRANÇOIS  
Monsieur F. GRAULLIER  
Monsieur Jean-Alexis GRIMAUD  
Madame Marie-Angèle HERMITTE

Madame Claudine HERZLICH  
Monsieur Jean-Pierre HUGOT  
Monsieur Henri-Pierre HUSSON  
Madame Denise JODELET  
Madame Joëlle LAMBLIN-ROBERT  
Madame Annie MARC  
Monsieur Patrick NETTER  
Monsieur Bernard PAILLARD  
Madame Nicole PASTEUR  
Monsieur Georges PERIES  
Monsieur Michel PIERRES  
Madame Hélène RICHARD-FOY  
Madame Claire RIGAUD-BULLY  
Monsieur Gérard SALEM  
Monsieur Michel SAUZADE  
Monsieur Bernard SELE  
Monsieur Florent SOUBRIER  
Monsieur Pierre TAMBOURIN  
Monsieur Bruno VARET  
Monsieur Daniel WIDLOCHER

## 20 - CONSTRUCTION DU LIEN SOCIAL : EQUILIBRES ET DÉSÉQUILIBRES DES SOCIÉTÉS

Madame Régine AZRIA  
Monsieur Serge BAHUCHET  
Monsieur Dominique BARJOT  
Monsieur Michel CHAUVIERE

Madame Nicole COMMERCON  
Madame Régine DELAMOTTE-LEGRAND  
Monsieur Michel DOBRY  
Monsieur Claude DUBAR

Monsieur Jean-Pierre GAUDIN  
Monsieur Jean MATHIOT  
Madame Catherine ROLLET

Monsieur Jean-Claude SCHMITT  
Monsieur Laurent THEVENOT

## **21 - PATRIMOINES, CULTURES ET SOCIETES**

Monsieur Jean-Jacques BASSELIER  
Monsieur Emilio BONVINI  
Monsieur Gérard COLLOMB  
Mademoiselle Claude COUPRY  
Madame Christiane DELPLACE  
Monsieur Jean-Charles DEPAULE  
Madame Katherine GRUEL  
Madame Caroline GYSS-VERMANDE  
Monsieur Philippe d'TRIBARNE

Monsieur Carlos JASCHEK  
Monsieur Henri-Pierre JEUDY  
Madame Françoise LEVAILLANT  
Monsieur Yves LUGINBUHL  
Monsieur Pierre-Michel MENER  
Monsieur Yves MICHAUD  
Monsieur R. RIMBOT  
Mademoiselle Jacqueline SCHON  
Monsieur J. SIX

## **22 - LES OUTILS DE LA RECHERCHE : MODÉLISATION, SIMULATION, MOYENS INFORMATIQUES**

Monsieur Bruno AMBUSSON DE CAVARLAY  
Madame Mireille BAYART  
Monsieur Jean BIGEON  
Monsieur Jean-Louis BILON  
Monsieur Nicolas BOULEAU  
Monsieur Patrice BOURDELAJS  
Monsieur Sébastien CANDEL  
Monsieur Gérard CHANTEUR  
Monsieur Jean-Marie CODRON  
Monsieur Jacques CORSET  
Monsieur Alain DEGENNE  
Monsieur Jean DENDIEN  
Monsieur Philippe DESSEN  
Monsieur Jean-Michel DROUFFE  
Monsieur Pierre DUMOLARD  
Monsieur Jean-Claude GARDIN  
Mademoiselle Line GARNERO  
Monsieur Christian GAUTHIER  
Madame Danièle GODARD  
Monsieur Jean-Michel GRIENENBERGER  
Madame Nadine GUILLEMOT  
Monsieur Jean-Pierre HUGOT  
Madame Monique JACOBZONE  
Monsieur Michel JEAN

Monsieur Denis JEANDEL  
Monsieur Michel KERZBERG  
Monsieur Jean-Yves LALLEMAND  
Monsieur Jean-Michel LAUNAY  
Monsieur Jean-Pierre LAUNAY  
Mademoiselle Claire LEVY  
Monsieur Pierre MALGRANGE  
Monsieur Dominique MANDON  
Monsieur Jean-Claude MATHIEU  
Monsieur Olivier METAIS  
Monsieur Jean-Claude NEDELEC  
Monsieur Robert PEJOUX  
Monsieur Pierre PFEUTY  
Monsieur Marius PTAK  
Monsieur André ROUGE  
Monsieur Xavier ROUSSET DE PINA  
Monsieur Michel SAUZADE  
Monsieur Jean-Paul SCHEIDECKER  
Monsieur Richard TOMASSONE  
Monsieur Pierre VALIRON  
Monsieur J. VANNINEMUS  
Monsieur Jean-Pierre VILOTTE  
Monsieur Jean VIRMONT

## 23 - LES OUTILS DE LA RECHERCHE : INSTRUMENTS, TECHNOLOGIES

Monsieur Jean-Pierre AMIRAULT  
Monsieur André ANTONETTI  
Monsieur B. AUBERT  
Monsieur François BLASCO  
Monsieur Michel BOUDINOT  
Monsieur Philippe BOUGEAULT  
Monsieur Thierry BRETHEAU  
Monsieur Spencer BROWN  
Monsieur Jacques CORSET  
Madame Elisabeth DARTYGE  
Monsieur Alain DESREUMAUX  
Monsieur Edouard DREYFUS  
Monsieur Jean-Pierre FENELON  
Monsieur Jean FEUNTEUN  
Monsieur Renaud FOY  
Monsieur Michel GAILLARD  
Monsieur J.F. KARCZEWSKI  
Madame Anne-Marie LAURIAN  
Monsieur Yvon LE MAHO  
Monsieur Jean-Marie LOISEAUX

Monsieur Maxime LE GOFF  
Monsieur Gilbert MAIRE  
Monsieur Jean-Claude MANI  
Monsieur Henri MARTINOT  
Monsieur Guy MICHELAT  
Monsieur Arnold MIGUS  
Monsieur Jean PANNETIER  
Monsieur Jacques PANTALONI  
Monsieur Jean-Claude PROME  
Monsieur Denis RAOUX  
Monsieur Jean-Claude REYNAUD  
Monsieur Christian ROLANDO  
Monsieur Daniel ROUAN  
Monsieur Patrick SAINT-DIZIER  
Monsieur Michel SAUZADE  
Monsieur Philippe SEIMPERE  
Madame Evelyne SERVERIN  
Monsieur André SOUFFLOT  
Madame Annette TARDIEU  
Monsieur Luc VALENTIN



## ***Listedessections***

### ***du Comité national du CNRS***

- 1 - Mathématiques et outils de modélisation
- 2 - Phénomènes physiques, théories et modèles
- 3 - Des particules aux noyaux
- 4 - Atomes et molécules - Optique et lasers - Plasmas chauds
- 5 - Matière condensée ; organisation et dynamique
- 6 - Matière condensée : structures et propriétés électroniques
- 7 - Sciences et technologies de l'information (informatique, automatique, traitement du signal)
- 8 - Electronique, semi-conducteurs - Photonique - Génie électrique
- 9 - Mécanique - Génie des matériaux - Acoustique
- 10 - Energie - Mécanique des milieux fluides et réactifs - Génie des procédés
- 11 - Planète Terre : structure, histoire et évolution
- 12 - Planète Terre : enveloppes superficielles
- 13 - Physique et chimie de la terre
- 14 - Système solaire et univers lointain
- 15 - Systèmes moléculaires complexes
- 16 - Molécules : synthèse et propriétés
- 17 - Molécules : structures et interactions
- 18 - Eléments de transition - Interfaces et catalyse
- 19 - Elaboration, caractérisation et modélisation du solide
- 20 - Biomolécules : structure et mécanismes d'action
- 21 - Biomolécules : relations structure-fonctions
- 22 - Thérapeutique et médicaments : concepts et moyens
- 23 - Génomes - Structures, fonctions et régulations
- 24 - Biologie cellulaire - Virus et parasites
- 25 - Interactions cellulaires
- 26 - Fonctions du vivant et régulation
- 27 - Biologie végétale
- 28 - Biologie du développement et de la reproduction
- 29 - Fonctions mentales - Neurosciences intégratives - Comportements
- 30 - Diversité biologique - Populations - Ecosystèmes et évolution

- 31 - Hommes et milieux : évolution, interactions
- 32 - Mondes anciens et médiévaux
- 33 - Formation du monde moderne
- 34 - Représentations - langages - Communication
- 35 - Pensée philosophe - Sciences des textes - Création artistique, scientifique et technique
- 36 - Sociologie - Normes et règles
- 37 - Economie et société
- 38 - Unité de l'homme et diversité des cultures
- 39 - Espaces, territoires et sociétés
- 40 - Politique - Pouvoir - Organisations

## ***Participation des sections du Comité national aux travaux des groupes thématiques***

01 - Les mathématiques et leurs interactions :  
*1, 2, 4, 5, 7, 9, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 30, 34, 37, 39.*

02 - Sciences et technologies de l'information :  
*1, 4, 5, 7, 8, 9, 14, 16, 19, 29, 34, 36, 37, 39, 40.*

03 - Sciences de la cognition et de la communication :  
*1, 2, 5, 7, 8, 9, 16, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 34, 35, 37, 38, 39.*

04 - Univers, noyaux, particules :  
*1, 2, 3, 4, 14, 16.*

05 - Planétologie comparée et système solaire :  
*4, 11, 12, 13, 14.*

06 - Ordre et complexité dans la matière :  
*1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 27.*

07 - Echelle mésoscopique de la matière :  
*2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 14, 15, 16, 18, 19.*

08 - Physique et chimie du solide :  
*3, 5, 6, 8, 9, 11, 13, 14, 17, 19.*

09 - Optique et électronique :  
*3, 4, 5, 6, 8, 10, 14, 16, 18, 19*

10 - Matériaux spécifiques pour des fonctions nouvelles ou complexes :  
*3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 22.*

11 - La chimie : de la réaction simple à la synthèse d'édifices élaborés :  
*4, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 27.*

12 - Génies, procédés : techniques, impacts, économie :  
*8, 9, 10, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 27, 29, 37, 39.*

13 - Les énergies du futur : ressources, maîtrise, technologies, économies, impacts :  
*3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 18, 19, 20, 27, 30, 36, 37, 39*

14 - La Terre : dynamique et changement global :  
*1, 2, 10, 11, 12, 13, 14, 30, 31, 36, 39.*

15 - Milieux, ressources, écosystèmes, risques ;  
*9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 23, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 40.*



16 - Architecture et dynamique moléculaires, systèmes biologiques :  
2, 5, 14, 16, 18, 20, 21 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30.

17 - Evolution : du génome aux biosystèmes :  
1, 2, 7, 11, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31 38,

18 - De la cellule aux structures intégrées des organismes :  
16, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30.

19 - Santé et thérapeutique :  
3, 8, 10, 16, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39.

20 - Construction du lien social, équilibres et déséquilibres des sociétés :  
**32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40.**

21 - Patrimoines, cultures et sociétés :  
3, 14, 16, 17, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39

22 - Les outils de la recherche : modélisation, simulation, moyens informatiques :  
1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 30, 33, 34, 36, 37, 39.

23 - Les outils de la recherche : instruments, technologies :  
3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 30, 32, 34, 36, 37.

## ***Organisation et animation de ce Rapport de conjoncture***

### **COMITE DE LECTURE**

Monsieur Bernard ARRIO  
Madame Chantai BALKOWSKI  
Monsieur Michel BERRY  
Monsieur Jean-Pierre BOURGUIGNON  
Monsieur Michel CROZON  
Monsieur Yves MERLE D'AUBIGNE  
Monsieur Lucien MONNERIE  
Monsieur Pierre TOUBERT  
Madame Arielle UNGERER

### **ANIMATION SCIENTIFIQUE**

Monsieur Michel CROZON

### **COORDINATION - ORGANISATION**

Monsieur Sames SICSIC

### **MAQUETTE, MISE EN PAGE ET REALISATION**

Madame Jacqueline LECLERE (Atelier de l'écrit)

### **SECRETARIAT**

Mademoiselle Nathalie LEGOULLON

# ***Table des matières***

Introduction	III
Avant-propos	V
01 - Les mathématiques et leurs interactions	1
02 - Sciences et technologies de l'information	21
03 - Sciences de la cognition et de la communication	47
04 - Univers, noyaux, particules	65
05 - Planétologie comparée et système solaire	<b>91</b>
06 - Ordre et complexité dans la matière	109
07 - Echelle mésoscopique de la matière	129
08 - Physique et chimie du solide	145
09 - Optique et électronique	163
10 - Matériaux spécifiques pour des fonctions nouvelles ou complexes	<b>179</b>
11 - La chimie : de la réaction simple à la synthèse d'édifices élaborés	197
12 - Génies, procédés : techniques, impacts, économie	225
13 - Les énergies du futur : ressources, maîtrise, technologies, économies, impacts	243
14 - La Terre : dynamique et changement global	263
15 - Milieux, ressources, écosystèmes, risques	279
16 - Architecture et dynamique moléculaires, systèmes biologiques	307
17 - Evolution : du génome aux biosystèmes	323
18 - De la cellule aux structures intégrées des organismes	343
19 - Santé et thérapeutique	363
20 - Construction du lien social : équilibres et déséquilibres des sociétés	389
21 - Patrimoines, cultures et sociétés	405
22 - Les outils de la recherche : modélisation, simulation, moyens informatiques	421
23 - Les outils de la recherche : instruments, technologies	439
Liste des participants aux travaux des 23 groupes thématiques	459
Liste des sections du Comité national du CNRS	469
Participation des sections du Comité national aux travaux des groupes thématiques	<b>471</b>
Organisation et animation de ce <i>Rapport de conjoncture</i>	473



Impression : Imprimerie Louis-Jean

Dépôt légal : 50 — Janvier 1993

ISBN 2-271-05016-2

© CNRS