

SYNTHÈSES

DES CONSEILS SCIENTIFIQUES DE DÉPARTEMENT



# SCIENCES PHYSIQUES ET MATHÉMATIQUES

Pascal LEDERER  
Colette MOEGLIN

Étienne Bustarret  
Rémi Jullien  
Pascale Launois  
Bernard Pire

L'unité du secteur SPM est fondée sur celle de la matière et de son reflet dans la théorie. Quel que soit le domaine particulier d'étude, les concepts d'énergie, d'espace, de temps, de causalité, les grandes lois de conservation liées aux grandes symétries, élaborés par des siècles d'études expérimentales et d'élaboration théorique sont le bagage commun des physiciens. Les mathématiques sont issues à la fois des concepts théoriques qui se dégagent de l'étude du réel, et de l'autonomie propre de ces concepts. Cette autonomie permet un développement indépendant des observations expérimentales. D'autre part les outils forgés par les mathématiques permettent en retour aux physiciens de généraliser les idées théoriques surgies des expériences.

Physique et mathématiques ont un rôle sociétal double, avec d'une part des progrès extraordinaires dans notre compréhension du monde et d'autre part, le développement d'applications majeures, dans tous les domaines. Leurs apports passés dans les domaines de la communication, du transport, de l'énergie, des technologies médicales, des nouveaux matériaux, par exemple, ont bouleversé et bouleversent les modes de vie, les techniques de production, les rapports entre les individus et entre les sociétés. Leur rôle au regard d'un certain nombre de questions clés du XXI<sup>e</sup> siècle (nanosciences et nanotechnolo-

gies, énergie, environnement, risques naturels, compréhension du vivant, etc.) sera tout aussi important.

La diversité des sections du secteur SPM reflète la diversité des domaines particuliers d'étude des lois fondamentales de la matière : de l'infiniment petit des quarks à l'infiniment grand de la cosmologie, en passant par les atomes, les molécules, et leurs assemblages de taille croissante, des nano-objets aux cristaux massifs et aux liquides. À toute échelle d'organisation de la matière, l'expression de l'universalité des lois physiques prend des aspects fondamentaux particuliers. Mais pour tout physicien, la mécanique classique décrit correctement les mouvements de la matière lorsque les vitesses sont très petites devant la vitesse de la lumière, et lorsque les actions considérées sont très grandes devant la constante de Planck. La mécanique quantique décrit les systèmes d'action comparable ou inférieure à la constante de Planck. La théorie de la relativité décrit les systèmes animés de très grandes vitesses.

Pour une part, la différenciation entre sections et disciplines est liée aux différences de techniques expérimentales. Si la physique des quarks exige de très grands instruments, celle de l'étude de l'interaction lumière-matière utilise les lasers, eux-mêmes de taille très diverses, comme instruments privilégiés d'investigation, cependant que l'étude de la matière condensée recourt à une multitude de techniques « légères » : RMN, STM, microscopie électronique, AFM, rayons X, photoémission, etc. Cependant, des TGE comme les synchrotrons, les piles à neutron ou les champs magnétiques intenses sont devenus des compléments expérimentaux indispensables aux laboratoires de physique légère. Par ailleurs, les centrales de technologies souples sont fondamentales pour l'élaboration de micro et nano-objets, et par là irriguent l'ensemble de la communauté des nanosciences. Ainsi coexistent des laboratoires où une problématique commune est attaquée par plusieurs techniques, et des laboratoires centrés sur une technique, où convergent des équipes aux intérêts très différents.

L'activité théorique, essentielle pour extraire des données expérimentales une description et des concepts qui reflètent, de manière toujours imparfaite et toujours perfectible, les lois fondamentales de la matière aux différentes échelles d'organisation, de taille ou de temps est elle-même diverse. Si elle dispose d'une section spécifique (section 02), à l'origine vouée à l'étude des particules aux plus hautes énergies des accélérateurs, mais couvrant de plus en plus tous les champs d'activité du SPM, elle se déroule aussi dans les sections majoritairement expérimentales.

L'échange vivant entre l'expérience et son reflet théorique, mène à des projets nouveaux, dans un processus continu de confrontation au réel. Ce processus est à chaque pas riche de potentialités technologiques inédites et d'applications imprévues.

## 1 – L'ÉMERGENCE DE THÈMES UNIFICATEURS

Plusieurs tendances actuelles du secteur SPM sont appelées à se renforcer dans la prochaine période :

Le développement des **nanosciences** se constate aussi bien dans la section 04 où les objets étudiés dans leur interaction avec la lumière tendent à se complexifier, de l'atome à la molécule ou l'agrégat, que dans les sections 05 et 06 où la taille des objets étudiés, soit isolément, soit collectivement, tend à se réduire jusqu'à l'échelle nanométrique ; cette évolution a sa contrepartie évidente dans la théorie. Ainsi, un certain nombre de domaines classiques de la physique se conjuguent désormais au « nano » : nano-manipulation, nano-électronique, nanomagnétisme (électronique de spin), nanophotonique, nano-fabrication, et dans tous ces domaines, de nouveaux concepts et de nouveaux matériaux sont découverts, avec de prometteuses applications technologiques à venir.

Une conséquence de cette évolution est l'exploration de plus en plus poussée des effets de la mécanique quantique aux échelles nanométriques, désormais accessibles à la manipulation en laboratoire. Les phénomènes de cohérence/décohérence quantique sont au cœur de ces **échelles intermédiaires** entre atome et solide massif. Des branches nouvelles sont en formation, comme l'informatique quantique ou la cryptographie quantique, ouvertes par la manipulation d'états quantiques intriqués.

L'**exploration de l'interface de la physique avec les objets et les systèmes biologiques** est en œuvre dans tout le secteur SPM. Que ce soit l'intérêt pour le métabolisme de l'ADN, l'approche statistique aux systèmes neuronaux, ou au repliement des protéines, fondamentaux pour comprendre l'activité des enzymes, cette tendance est perceptible partout.

Une autre tendance générale est l'exploration de la **complexité** : nucléons en interaction forte au sein du noyau, instabilités d'un plasma chaud, filamentation d'un faisceau laser, vieillissement des verres de spin, effet Hall quantique fractionnaire, transition isolant-métal, matériaux granulaires, émulsions, croissance d'interfaces lors d'une réaction chimique, sont des thèmes qui tous, obligent à aborder des concepts nouveaux, et à dégager la simplicité au cœur de la complexité.

Enfin, dans toutes les disciplines, en mathématiques comme en physique, les **méthodes numériques**, simulations, modélisation, calcul ab initio, etc., se sont installées comme un complément indispensable à l'expérience, comme à la théorie. L'évolution rapide de la puissance des ordinateurs va donner à cette activité une efficacité et une importance croissantes.

## 2 – AU DELÀ DES THÉMATIQUES COMMUNES : LA DIVERSITÉ

Les disciplines représentées dans le secteur SPM montrent à la fois des signes évidents de convergence dans l'émergence de thématiques communes, et des signes de diversification dans la dynamique de leurs champs propres de connaissance.

### 2.1 MATHÉMATIQUES

En mathématiques encore plus qu'ailleurs, CNRS et Université sont des partenaires indissociables pour l'élaboration de la politique scientifique. Le rôle fédérateur du CNRS et du département SPM s'est exprimé comme lieu où sont affirmés les principes de cette politique. La politique du CNRS a permis le développement d'un tissu d'écoles doctorales extrêmement vivantes et d'une qualité étonnante. L'attrait de la recherche mathématique sur une élite d'étudiants existe encore, et le résultat est un vivier de jeunes docteurs – dont on peut espérer qu'il perdurera, et avec la même qualité, si on peut leur faire entrevoir des débouchés. Ceci traduit le fait que recherche et formation vont de pair. Les barrières entre mathématiques pures et mathématiques appliquées se sont largement estompées et une interaction entre ces domaines, auparavant clairement distingués, est la seule garantie d'une excellence dans chacun de ces domaines. Le rapport de conjoncture réalisé par la section 01 montre cette évolution particulièrement riche. Le prix Abel décerné à Jean-Pierre Serre et la médaille Fields décernée à Laurent Lafforgue montrent aussi que seule une interaction entre les domaines anciennement appelés algèbre, géométrie et analyse est à même de faire progresser les mathématiques. C'est donc l'unité des mathématiques qui se construit pour le plus grand bénéfice des applications et qui doit être soutenue.

L'interaction traditionnelle physique-mathématiques était surtout entre physique théorique et mathématiques dites appliquées tandis que aujourd'hui nous assistons de plus en plus à des vraies collaborations avec l'ensemble des mathématiques, les travaux d'Alain Connes en sont un des exemples.

## 2.2 PHYSIQUE THÉORIQUE

Les objectifs en physique des particules sont l'exploration des nouvelles idées sur la structure des interactions fondamentales aux très petites échelles. Des expériences au sein du SLAC (Stanford Linear Accelerator Center, USA), de KEK (High Energy Accelerator Research Organization, accélérateur au Japon) et du CERN (European Organization for Nuclear Research, accélérateur en Suisse) permettront d'affiner nos connaissances sur le secteur des quarks du modèle standard. Le point focal de la physique des particules concerne le secteur de brisure de la symétrie électro-faible, et les tests directs du modèle standard. La recherche du boson de Higgs sera poursuivie, au Tevatron (USA), puis au LHC (Large Hadron Collider, Suisse). Par ailleurs, de nombreux indices laissent à penser que le modèle standard n'est qu'une partie valable à basse énergie d'une théorie beaucoup plus complète. Les résultats expérimentaux au LHC, comme les observations astrophysiques (matière noire, rayons cosmiques de très grande énergie), devraient permettre de tester certaines des nouvelles idées théoriques.

La théorie et la phénoménologie des supercordes, en lien étroit avec la physique expérimentale des particules, la cosmologie et l'astrophysique ont connu et connaîtront de développements importants. La théorie des supercordes, en lien avec les mathématiques, les expériences sur les effets gravitationnels, la cosmologie et l'astrophysique, tente d'unifier gravitation et physique quantique. L'investissement théorique considérable placé ces dernières années dans ce domaine

devrait être récompensé par des avancées majeures. L'énigme que continuent d'être les neutrinos (masses, mélanges) devrait bénéficier de l'important effort expérimental au niveau mondial. La cosmologie observationnelle ouvre une nouvelle fenêtre sur la physique des hautes énergies. Une étape décisive serait franchie si les particules qui composent la matière noire étaient détectées et identifiées. Les mesures récentes de la décroissance de luminosité des supernovae avec le décalage vers le rouge suggèrent que l'expansion de l'univers est actuellement accélérée ; on en conclut que 70 % de l'univers serait sous forme d'« énergie noire ». L'explication de cette dernière est devenu un enjeu majeur de la cosmologie. De même, la recherche des ondes gravitationnelles est un enjeu majeur de physique.

Le noyau atomique reste un des laboratoires privilégiés pour tester la chromodynamique quantique, théorie fondamentale des interactions fortes dont on ne comprend pas encore le fonctionnement dans le secteur des distances de l'ordre du femtomètre : or c'est à ces distances qu'agissent les phénomènes de confinement des quarks et des gluons. Et c'est aussi là qu'apparaît la structuration des états nucléaires, et tous les problèmes de stabilité ou d'instabilité des noyaux. La physique hadronique qui étudie les propriétés des hadrons (baryons et mésons) et tente de tomographier leur structure interne profite des expériences de moyenne énergie, souvent avec des faisceaux d'électrons. L'étude de la structure des noyaux et des états nucléaires loin de la stabilité qui se fait plutôt à partir des expériences avec des faisceaux d'ions, est un problème caractéristique de l'exploration de la complexité dans le domaine quantique.

## 2.3 ATOMES ET MOLÉCULES, OPTIQUE ET LASERS, PLASMAS CHAUDS

Au cœur de cette discipline, des concepts nouveaux apparaissent, issus de la recherche fondamentale, et engendrent des idées d'applications que la simple extrapolation des techniques existantes n'aurait même pas permis d'imaginer. Ainsi l'idée de calcul quantique est-elle le fruit de décennies de développements du contrôle d'atomes et de systèmes « à deux niveaux », dont beaucoup pensaient qu'ils resteraient à jamais des cas d'école. Ainsi l'optique fait-elle brusquement irruption dans le domaine des techniques d'accélération des particules chargées, parce que la focalisation de faisceaux lasers permet d'atteindre des champs électriques instantanés qui rivalisent avec ceux des grands accélérateurs. Ainsi le refroidissement des atomes par laser, longtemps discipline académique, a-t-il débouché sur la production de condensats de Bose-Einstein qui sont beaucoup plus près d'un système idéal que les exemples historiques de l'hélium superfluide et des supraconducteurs. Ainsi encore l'optique non-linéaire nous revoit-elle une solution inédite d'analyse des signaux radio-fréquence.

La physique atomique étudie des systèmes simples et bien contrôlés. Cela permet d'une part des expériences de grande précision pour tester les lois fondamentales et, d'autre part, d'étudier et de comprendre les mécanismes les plus subtils de la mécanique quantique. Dans ces domaines, les progrès les plus récents concernent la métrologie temps-fréquence (les horloges à fontaine atomique ont maintenant atteint une exactitude meilleure que  $10^{-15}$ ), les tests des interactions fondamentales sur des systèmes simples et l'étude des limites de la mécanique quantique (manipulation des états intriqués).

La physique moléculaire est à la fois physique fondamentale et ouverture vers l'environnement, vers l'astrochimie, la chimie du vivant et les nanosciences. Le développement de sources laser à impulsions ultra-brèves et la mise en service prochaine

d'une source de rayonnement synchrotron de troisième génération française (SOLEIL) ouvrent de nouvelles perspectives. À côté de la spectroscopie à haute résolution se développe une spectroscopie résolue en temps qui peut sonder des espèces instables, excitées, et qui a débouché sur une nouvelle approche, la femtochimie.

La décennie écoulée a vu le développement de nouvelles sources de lumière capables de produire un rayonnement avec des caractéristiques jusque là inatteignables, repoussant ainsi les frontières du faisable vers les hautes fréquences, les basses fréquences, les très courtes durées et les très fortes puissances de crête, ouvrant la voie à la production de particules.

La maîtrise de la fusion thermonucléaire est une étape indispensable avant la conception de réacteurs à fusion, qui constituent l'une des clés des problèmes énergétiques du siècle commençant. Deux grandes voies sont explorées, la fusion par confinement magnétique, et par confinement inertiel. Dans ce dernier cas, la source d'énergie initiale est constituée de lasers de puissance.

La lumière est mise en œuvre de manière de plus en plus performante, que ce soit au niveau de la taille des dispositifs et de la précision nanométrique des diagnostics ou dans la qualité des faisceaux (fluctuations jusqu'au niveau quantique). La maîtrise des techniques et des processus permet de dominer ou de tirer parti des fluctuations quantiques, de l'auto-organisation spontanée des faisceaux et de réaliser des composants optiques ultra-performants grâce à la multifonctionnalisation.

## 2.4 MATIÈRE CONDENSÉE – ORGANISATION ET DYNAMIQUE

La matière condensée peut maintenant être étudiée dans tous ses états (cristaux, verres, liquides, etc.), sous toutes ses formes (matériaux massifs et leurs surfaces, milieux

divisés ou inhomogènes, nano-objets et hétérostructures, etc.) et en toutes conditions (température et pression extrêmes, sous irradiation, sous sollicitations mécaniques, électriques, magnétiques, etc.). Les problématiques sous-tendant ces études peuvent être déclinées sur les thèmes des nanosciences, de la physique de l'irrégularité ou caractérisées par leur interdisciplinarité, comme explicité ci-après, avec pour outils d'expérience la microscopie (électronique, en champ proche, etc.), la diffusion des rayons X ou la diffusion des neutrons. Dans les deux derniers cas, l'apport des grands instruments (European Synchrotron Radiation Source et Institut Laue Langevin à Grenoble, ou SOLEIL – en construction – et Laboratoire Léon Brillouin en région parisienne) est souligné.

Le développement des nanosciences et des nanotechnologies repose sur la maîtrise structurale des nano-objets, de l'échelle atomique jusqu'à leur assemblage en dispositifs. Citons, à l'échelle du nano-objet individuel, l'exemple des nanotubes de carbone, dont les propriétés physiques ou chimiques dépendent fortement de la structure et à plus grande échelle, les matériaux massifs nanostructurés, où les interactions entre nano-objets permettent d'obtenir des propriétés particulièrement intéressantes. Soulignons aussi l'aspect nouveau de la science des surfaces considérées comme supports de nanostructures (auto-organisation, adsorption, etc.).

La **physique de l'irrégularité** englobe les problèmes de croissance, de morphogénèse, ainsi que la description des **systèmes et matériaux désordonnés et/ou hétérogènes**, où les équipes françaises sont pionnières, qui est un pôle très actif. Dans tous ces systèmes, une attention particulière est portée sur les propriétés élastiques, la propagation des ondes (notamment les effets liés à la diffusion multiple), les propriétés de transport (massique, thermique, électrique) et surtout les problèmes de vieillissement (pour lesquels des analogies intéressantes ont récemment été mises en évidence). Dans les verres, les problèmes liés au non-équilibre (comme la non-applicabilité du théorème fluctuation-dissipation) sont des sujets d'étude en plein

essor qui devraient déboucher sur des applications pratiques. Dans les granulaires le rôle joué par la polydispersité des grains, leurs propriétés mécaniques, la nature précise des forces de contact avec les parois du récipient et entre grains (et l'influence des conditions externes comme l'hygrométrie) restent encore des problèmes ouverts. La recherche de matériaux poreux susceptibles de stocker différents composants spécifiques, comme des nano-objets, est en fort développement. L'obtention de matériaux à pores nanométriques calibrés sera développée pour étudier les propriétés de certains liquides en milieu confiné. L'étude des mousses qui est actuellement très bien développée du point géométrique devrait s'étendre vers la compréhension des effets dynamiques (écoulement, vieillissement). Dans les pâtes et les suspensions, les problèmes de rhéologie et de diffusion devront être étudiés en liaison avec les applications industrielles (notamment les réacteurs chimiques à lits fluidisés).

#### À l'interface avec d'autres disciplines

que la physique, il faut entre autres mentionner l'importance des études sous très hautes pressions pour les géologues ou celle de la détermination des structures macromoléculaires pour les biologistes. De plus, les extraordinaires manipulations de molécules isolées d'intérêt biologique méritent une mention à part. On sait ouvrir une molécule d'ADN, et mesurer la force nécessaire, qui montre des variations reliées à la séquence des paires de bases. On a pu ainsi mesurer les forces développées par une ARN polymérase lors de la transcription d'une molécule d'ADN. Le but est de comprendre le fonctionnement de ces moteurs moléculaires.

## 2.5 MATIÈRE CONDENSÉE : STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS ÉLECTRONIQUES

Il s'agit :

- d'étudier, théoriquement et expérimentalement, des systèmes électroniques modèles pour questionner et enrichir notre connaissance



des lois fondamentales, dans, et au delà, de la physique de la matière condensée ;

– d’expliquer et contrôler des propriétés originales (notamment optiques, magnétiques, électriques) induites par le comportement des électrons de la matière placés dans des situations inédites ;

– mettre au point de nouveaux outils d’investigation, de modélisation ou d’élaboration de la matière condensée, et de les mettre à la disposition des autres disciplines scientifiques.

Traditionnellement, on a visé, et on cherche encore à établir et à expliquer la structure des niveaux électroniques d’un système – qui gouverne leurs propriétés – en fonction de paramètres physiques contrôlés ; température, champ magnétique ou électrique, pression, dopage, désordre, etc.

Dans un nombre croissant de cas, les surprises expérimentales et théoriques majeures proviennent de, et sont à prévoir dans des matériaux dans lesquels les électrons interagissent si fortement que les objets quantiques de basse énergie qui gouvernent le comportement de la matière n’ont rien à voir avec les électrons individuels. Telle est la situation dans une physique en développement rapide, qui est celle des oxydes, ou de divers sels de métaux de transition, mais aussi des couches bi-dimensionnelles des hétérojonctions, ou encore d’une variété croissante de matériaux organiques.

L’infinie diversité des matériaux que la chimie peut élaborer promet de riches moissons d’états électroniques nouveaux, aux propriétés encore insoupçonnées, et insoupçonnables, en l’absence de guide théorique, malgré des avancées intéressantes de méthodes de champ moyen. Elle impose de rechercher des formes de concertation et de co-élaboration nouvelles, entre physiciens, physico-chimistes et chimistes du solide. Du point de vue théorique, au delà des méthodes numériques appelées à de grands développements, mais encore limitées souvent à traiter de petits systèmes, la question centrale est d’élaborer, et de développer des

approches permettant d’avancer dans la jungle des interactions fortes. La combinaison des outils théoriques existants avec les approches numériques utilisant des moyens informatiques de plus en plus puissants est sûrement appelée à se développer.

Les progrès des techniques de croissance bidimensionnelle permettent d’élaborer des empilements de couches de matériaux de nature différente. Ceux-ci ont des propriétés originales si l’on met à profit les effets d’interface, de couplage à travers des barrières très minces, ou encore de confinement dans des puits d’épaisseur nanométrique. Ainsi la magnétorésistance géante des multicouches magnétiques et les nanostructures semi-conductrices à puits quantiques, qui ont permis des avancées fondamentales (effet tunnel polarisé, effet Hall quantique) ont-elles déjà des applications grand-public respectivement dans les capteurs magnétiques (dont les têtes de lecture des disques durs) et dans l’opto-électronique des télécommunications. Ces applications, si elles sont issues de découvertes expérimentales récentes, utilisent pour l’essentiel des approches théoriques « à un électron » des années 70. Plus récemment, tout en proposant de nouveaux développements de l’électronique de spin et de l’ingénierie des bandes aux technologies de l’information et de la communication, les recherches se sont orientées vers des objets également susceptibles d’applications mais dont plus d’une dimension est nanométrique : agrégats et plots magnétiques, fils et boîtes quantiques, nanotubes.

Grâce au développement rapide des sondes locales résonantes, notamment sur les grands instruments, et à l’avènement des microscopies à champ proche qui ont renouvelé la physique des surfaces, on peut désormais envisager d’étudier et, parfois, de manipuler un nano-objet individuel.

Un autre thème en plein essor est celui de la physique mésoscopique. Ces études à une échelle intermédiaire entre celle du nanomètre et l’échelle macroscopique ont mené à la découverte de phénomènes fondamentaux liés à la cohérence de phase des fonctions d’onde

électronique. Le passage entre la physique quantique et la physique classique s'en trouve éclairé de manière nouvelle. Plutôt que sur les objets eux-mêmes (matériaux bien connus mis en forme par des technologies éprouvées, par ex. gaz 2D d'électrons ou anneaux supraconducteurs et jonctions Josephson) qui sont aussi proches que possibles du modèle, les recherches portent sur les nouveaux concepts généraux liés à la réduction de la taille des systèmes physiques et du nombre de « canaux » de conductance. Pour maximiser les effets de la cohérence quantique, les expériences s'effectuent presque toujours à basse température sur des objets submicroniques. Il est en principe ainsi possible d'anticiper les propriétés à plus haute température d'objets beaucoup plus petits et dont ni la fabrication ni la mesure ne sont encore maîtrisées.

Pour conclure, on notera qu'avec l'évolution des thèmes de recherche, la distinction entre les trois sous-disciplines sont les semi-conducteurs, le magnétisme et la supraconductivité a perdu une partie de sa pertinence. Un exemple en est l'étude de la réponse des systèmes aux temps très courts que permettent des expériences à laser femtoseconde de plus en plus répandues : dans le cas de la dynamique d'aimantation, il faut ainsi tenir compte simultanément de la répartition des électrons près du niveau de Fermi, du mouvement des atomes et de l'ordre magnétique local.

### **3 – INTERDISCIPLINARITÉ : LE SECTEUR SPM EST EN RELATION AVEC TOUS LES AUTRES DOMAINES DES CONNAISSANCES**

Les interfaces de nos disciplines sont très développées et fertiles, tant avec la chimie, l'astrophysique, les sciences de l'environnement, la physique nucléaire, qu'avec les

sciences de l'information, les nanosciences en général, la biologie, mais aussi la philosophie ou les sciences humaines.

#### **3.1 AVEC LA CHIMIE**

Une spécificité de la chimie est que cette science crée ses propres objets. Mais, étudiant les lois et les matériaux élémentaires de la nature, ses rapports avec la physique sont étroits, et les frontières souvent floues, comme on le constate, par exemple, pour la chimie du solide, dont les composés et matériaux nouveaux sont souvent sources de découvertes importantes en physique de la matière condensée. Ainsi, la chimie organique a par exemple fourni des composés modèles qui ont permis d'explorer des effets nouveaux de basse dimensionnalité spatiale.

Il est désormais possible de suivre le processus chimique élémentaire à l'échelle picoseconde ou femtoseconde au cours d'une réaction photochimique, par exemple lors de l'irradiation d'une molécule biologique.

En utilisant les lasers, on peut « déposer de l'énergie » dans une molécule de façon à contrôler sa fragmentation ou sa réactivité chimique.

#### **3.2 AVEC L'ASTROPHYSIQUE ET LES SCIENCES DE LA TERRE**

Un fort couplage avec l'astrophysique a lieu en amont (expériences de laboratoires ou calculs simulant les conditions physiques des milieux astrophysiques) ou en aval, avec l'interprétation des mesures spatiales.

Les connexions de la cosmologie, ou de la physique des particules avec l'astrophysique ont été évoquées plus haut.

Dans les sciences de la Terre, la connaissance des propriétés physiques des matériaux du

manteau terrestre, la physique des propagations d'ondes en milieu désordonné, l'étude des mouvements complexes des différents fluides qui composent le cœur de la planète, de leur relation au champ magnétique terrestre, à l'activité volcanique, etc., sont des exemples parmi d'autres des rapports étroits de ces sciences avec différents domaines de la physique.

### **3.3 AVEC LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET LA PHYSIQUE DES PARTICULES**

Il y a un lien très fort entre les études menées dans le département SPM en physique théorique des interactions fondamentales et les expériences menées par les laboratoires de l'IN2P3 et du DAPNIA-CEA ; la co-organisation de conférences, la participation aux écoles d'été et aux comités d'évaluation des laboratoires, les séminaires communs et bien sûr les discussions journalières enrichissent mutuellement théoriciens du SPM et expérimentateurs. D'autre part, les acquis nouveaux de l'optique ou de la physique des solides (supraconducteurs, etc.) sont amplement utilisés dans les expériences de physique des particules et de physique nucléaire. La simulation numérique de ces expériences nécessite l'emploi d'outils issus de la recherche en mathématique appliquée. Enfin, l'utilisation de lasers intenses est envisagée comme futur moyen d'accélérer les particules (*Voir plus haut*).

### **3.4 AVEC L'INFORMATIQUE**

Des applications aussi bien en algorithmique que dans l'étude des problèmes complexes qu'en neurosciences.

### **3.5 AVEC LA PHYSICO-CHIMIE DE L'ATMOSPHÈRE**

La spectroscopie et la dynamique de formation et de destruction des systèmes carbonés constitue un intérêt commun à cette interface : l'astrochimie. L'étude des systèmes carbonés intéresse également physiciens et physico-chimistes de l'atmosphère.

Les problèmes de fumées, de pollution atmosphériques sont liés à la physique des agrégats fractals, etc.

Plusieurs équipes développent des méthodes de mesures d'absorption intra-cavité (CRDS pour cavity ringdown spectroscopy, ou ICLAS) : elles ouvrent des perspectives pour la détection de composés organiques volatils, molécules instables, radicaux, toxiques. Les Lidar (light detection and ranging) sont très utiles en physico-chimie de l'atmosphère.

### **3.6 AVEC LA BIOLOGIE**

La biophysique se développe dans plusieurs directions : les molécules biologiques (protéines, ADN, etc.) posent des problèmes intéressants en physique : condensation et organisation de l'ADN dans le noyau ou dans les virus, manipulations de molécules uniques d'ADN, repliements des protéines, réseaux neuronaux, systèmes modèles de membranes biologiques, etc.

Des interactions entre molécules à l'échelle de la cellule, où des problèmes de mobilité d'adhésion, de pénétration, d'auto-assemblage se posent et impliquent, de l'échelle de la cellule à celle des tissus, un travail de conceptualisation et de quantification auquel les physiciens doivent contribuer.

Par ailleurs, les mécanismes fondamentaux de relaxation et fragmentation des systèmes moléculaires complexes et des protéines sont mal connus : processus éner-

gétique, dynamique, processus de localisation de l'énergie. La compétence acquise en spectrométrie de masse peut être transférée à ces complexes moléculaires.

Les progrès de l'imagerie et de la microscopie d'objets biologiques sont importants et se poursuivront (tomographie cohérente optique, fluorescence résolue en temps, RMN, microscopie non linéaire, utilisation du rayonnement synchrotron, etc.) Citons pour mémoire d'autres thèmes importants : la biomécanique – l'enzymologie sur molécules uniques – les questions de morphogenèse (végétale par exemple) – l'adhésion cellulaire – les réseaux de gènes et régulation de leur expression, bruit stochastique

### **3.7 AVEC SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGÉNIEUR**

Le seul énoncé des thèmes de recherche du département SPI suffit à signaler les rapports très étroits des recherches de ce département avec celles menées en SPM. Traitement, interprétation du signal, de la parole et de l'image ; technologie et physique des composants, microsystemes, nanostructures, micro et nano-électronique, lasers, opto-électronique, tribologie, milieux poreux, élaboration de matériaux, etc. : il y a, dans tout ces domaines, imbrication étroite, parfois fusion, entre les recherches fondamentales, souvent menées en SPM, et les développements originaux qui développent les connaissances dans ces thématiques de SPI.

### **3.8 AVEC LES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LA COMMUNICATION**

Là encore, il n'est pas utile de développer longuement sur le rapport de plus en plus étroit entre les progrès en physique et en mathématiques

dans le développement de cette science et de ces technologies. Quiconque utilise un ordinateur, un téléphone portable, internet, etc., se sert de progrès de connaissances fondamentales de plus en plus rapidement transférées vers la technologie, qui développe de son côté ses méthodes spécifiques. Les technologies de la communication de demain seront directement liées aux avancées d'aujourd'hui dans les différentes disciplines de la physique. Les thèmes cités plus haut dans ce rapport, de la cryptographie quantique, de l'ordinateur quantique, de l'imagerie dans tout ses aspects, des systèmes neuronaux, etc., illustrent, parmi d'autres, le lien de plus en plus direct entre avancées fondamentales en physique, mathématiques, et STIC.

### **3.9 AVEC LA PHILOSOPHIE**

Les différentes branches de la physique sont pour les philosophes de la connaissance un terrain privilégié d'études, d'expérimentation et de réflexion. Le rapport entre la matière et la pensée, le cheminement complexe de la représentation du réel dans les concepts qui le reflètent dans l'esprit des humains trouvent dans la physique, ses méthodes, ses révolutions épistémologiques, ses controverses, ses erreurs et ses certitudes un inépuisable terrain d'études, de même que l'élaboration des concepts mathématiques, le surgissement, à partir de l'expérimentation reproductible, de théories mathématiques nouvelles, leur autonomie relative par rapport au réel, leur effet en retour sur la théorie et l'expérience.

Les progrès que permet l'imagerie (notamment les techniques de SQUID, ou la RMN) dans la connaissance des mécanismes de la pensée individuelle vont nourrir les débats philosophiques sur l'inné et l'acquis, sur l'essence sociale et biologique de la personnalité humaine dans des termes radicalement nouveaux, qui intéressent la psychanalyse et l'anthropologie.

### 3.10 AVEC LES SCIENCES HUMAINES

Dans de multiples disciplines de ce secteur, les méthodes expérimentales subissent, comme partout dans la vie sociale, des bouleversements de plus en plus rapide qui découlent d'innovations technologiques fondées sur les développements des connaissances en physique et en mathématiques : techniques de datation et méthodes spectroscopiques en archéologie, méthodes statistiques en sociologie, méthodes numériques en linguistique ou en économie, etc.

### 3.11 AVEC L'UNIVERSITÉ

Les laboratoires du SPM jouent un rôle de formation pour les doctorants, en partenariat avec les universités. La très grande majorité des unités du département sont associées aux Universités (UMR). Mais ils assurent aussi une mission de formation auprès des étudiants d'IUT ou de DESS, en offrant, dans certains laboratoires, des plates-formes d'expérimentation. Les laboratoires de SPM contribuent à la formation de personnels de l'industrie à certaines techniques de pointe, par exemple dans les nanotechnologies, ou les technologies des lasers. Enfin, en interne, des ateliers à destination des ITA et des chercheurs peuvent être organisés par le biais de la formation continue. La tenue d'écoles à caractère fortement inter-disciplinaire doit aussi être soutenue. L'association étroite

des unités du CNRS avec l'Université permet une transmission des connaissances en prise avec les avancées les plus récentes, grâce à la présence d'enseignants chercheurs dans les équipes de recherche auxquelles sont affectés les chercheurs. Dans l'état actuel du potentiel de recherche français en physique et mathématiques, un renforcement du rôle des Universités dans le dispositif national de recherche ne peut se concevoir sans des moyens budgétaires accrus au SPM du CNRS, et sans une politique audacieuse de recrutement de jeunes chercheurs sur postes permanents.

## 4 - CONCLUSION

Au cœur d'une démarche scientifique féconde et rigoureuse, la Recherche en Physique et en Mathématiques irrigue de ses progrès tous les champs de la connaissance et de l'activité humaine. Le développement de nos disciplines, avec les moyens adéquats en fonctionnement des équipes, des Très Grands Instruments aux laboratoires de physique légère, avec des carrières attractives, stables, offertes aux jeunes dès leur thèse en nombre suffisant, dans le secteur public comme dans le secteur industriel, est un impératif pour quiconque se soucie de contribuer au développement de la connaissance comme de la société.

