

Editorial de Daniel Vidal-Madjar, Directeur adjoint de l'INSU

Afin d'être en situation de remplir sa vocation d'agence de moyens et de programmation pour les sciences de l'Univers au service des équipes de recherche du CNRS et des Universités, l'INSU organise à intervalle régulier des réflexions prospectives par grands domaines thématiques.

Le dernier exercice de ce genre pour les sciences dites de l'atmosphère et de l'océan avait eu lieu en 1993 (colloque d'Hourtin). Il avait permis la mise en chantier de plusieurs actions importantes pour nos disciplines comme, par exemple, la mise en place d'une politique de soutien aux services d'observation ou encore la création du programme de recherche en hydrologie.

La décennie 90 a été marquée par de nombreuses avancées dans les domaines de l'océan et de l'atmosphère et leurs interactions avec les surfaces continentales : meilleure compréhension de la dynamique du climat, meilleure compréhension du fonctionnement biogéochimique des zones côtières, représentation de plus en plus réaliste des processus météorologiques à petite échelle, plus grande maturité des outils d'observation spatiale dans plusieurs domaines (physique et chimie de l'atmosphère, dynamique et biogéochimie de l'océan, bioclimatologie continentale), émergence de l'océanographie opérationnelle, pour en citer quelques-unes. De plus, avec l'aboutissement de nos programmes, l'évolution de la demande sociétale vers des préoccupations environnementales de plus en plus pressantes imposait de revoir notre positionnement vis-à-vis des utilisateurs des résultats de nos recherches.

Il était donc important que notre communauté se retrouve pour un nouvel exercice. En premier lieu, cet exercice devait permettre de faire le point sur les dix dernières années de travaux de recherche internationaux, et singulièrement sur le rôle que nous y avons joué ou sur nos absences. Ensuite, grâce à une réflexion collective sur nos engagements scientifiques et les besoins associés, il devait indiquer ce que nos équipes souhaiteraient pour les dix prochaines années, pour les programmes à mettre en place comme pour les grands moyens expérimentaux mis à leur disposition.

La direction de l'INSU a donc demandé au Conseil scientifique de l'INSU, au travers de sa Commission spécialisée pour les sciences de l'océan et de l'atmosphère (CSOA) d'encadrer un exercice de prospective en 2000. Cet exercice s'est déroulé sur plusieurs mois. Il a commencé par un séminaire de réflexion en novembre 1999 à Gif-sur-yvette, auquel plus d'une trentaine de nos collègues ont été invités. Il s'est conclu par un grand colloque à Brest en septembre 2000. Entre ces deux dates, plusieurs groupes de travail ont été réunis sur divers sujets centraux pour l'INSU et le Département scientifique des Sciences de l'Univers (évolution des structures de recherche, services d'observation, équipements scientifiques); des documents de synthèse ont été produits et largement discutés et amendés par l'ensemble de la communauté scientifique concernée, qu'elle appartienne au CNRS ou aux autres organismes de recherche partenaires de l'INSU.

Le colloque de Brest, qui a réuni plus de 200 personnes de divers horizons, a bien sûr permis de présenter les résultats de l'année de réflexion. Il a surtout servi à faire travailler nos collègues sur les nouvelles conditions dans lesquelles nous devons exercer notre métier de chercheur dans des domaines-clefs touchant à l'environnement : relations à mettre en place avec les donneurs d'ordre de recherche, rôle de notre communauté dans l'expertise, place de l'Europe et de l'Espace Européen de la Recherche dans l'organisation de notre programmation, insertion dans les grands programmes internationaux qui rythment l'essentiel de nos projets. Certaines des recommandations issues de ce travail sont en cours de mise en oeuvre. D'autres le seront prochainement, en particulier dans le sillage du renouvellement de nos programmes sur le climat. Des contacts ont été noués avec nos organismes partenaires pour faire avancer certains points, notamment sur les aspects touchant au développement instrumental, la réalisation et le fonctionnement des très grands équipements dont nous avons le plus grand besoin, ou encore la place et la gestion des services d'observation.

Je voudrais cependant exprimer un regret. Par manque de temps, ou plus probablement par manque de maturité, nous n'avons au cours de ces mois de travail que marginalement abordé les questions relatives aux recherches "intégrées" sur l'environnement, c'est-à-dire celles qui font appel non seulement aux sciences de la nature (sciences de la planète et sciences de la vie), mais également à certains aspects des sciences de l'homme et de la société : économie, sociologie, politique, droit, histoire, géographie. Je suis convaincu que ce chantier devra être ouvert rapidement de façon à réussir l'intégration de ces disciplines dans nos démarches pour mieux comprendre et décrire le fonctionnement de notre système terre, homme compris.

Les vingt dernières années ont permis un rapprochement efficace entre les sciences de la planète et les sciences de la vie. Je souhaite vivement que les dix prochaines nous permettent d'avancer sur ce front.

Pour finir, je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont permis à ce travail de voir le jour, malgré toutes les difficultés qu'un tel exercice comporte. Je suis convaincu que ce document final sera un des principaux outils d'orientation au service de nos communautés, que les équipes dépendent de l'INSU ou des autres organismes concernés par ces domaines de recherche, avec lesquels nous travaillons depuis longtemps en étroite collaboration. Ces nouvelles orientations auront non seulement des conséquences sur les engagements de l'INSU mais également sur les nécessaires évolutions à susciter dans nos métiers, que ce soient ceux du chercheur ou ceux des personnels techniques.

Bilan du comité de pilotage

Les sciences de l'environnement planétaire constituent un champ scientifique extrêmement vaste qui offre un double visage

Le premier est celui d'un nouveau champ de la connaissance ouvert par l'exploration systématique et quantitative de l'océan, de l'atmosphère et des sols. La complexité de ces systèmes et la pluralité des mécanismes qui les gouvernent sont un défi qui ne peut être relevé que par une approche résolument interdisciplinaire et une conjonction des efforts, que ce soit dans l'observation ou la modélisation. Le second est celui d'une planète habitée, où l'environnement conditionne les activités humaines mais où l'impact de l'homme sur l'environnement est aussi de plus en plus marqué. La demande sociale va aujourd'hui bien au delà des prévisions météorologiques et pose une vaste série d'interrogations, se tournant vers les scientifiques pour construire la science de la symbiose de l'homme avec la planète. De ce fait, les sciences de l'environnement sont soumises à deux dynamiques, celle du développement des connaissances scientifiques d'une part, qui réclame de se faire selon sa logique et ses rythmes propres, et celle du besoin croissant et urgent d'outils pour prévoir et gérer l'environnement, et éventuellement le corriger ou s'adapter à ses changements.

En raison de cette approche systématique et globale, il est inévitable que les grandes questions scientifiques, comme l'évolution du climat, présentent une certaine permanence dans le temps

Derrière cette façade, les connaissances et les outils évoluent rapidement. Pour un nombre croissant de processus, la modélisation quantitative qui débouche sur de nouveaux outils ou paramétrisations numériques est venue se joindre à la description phénoménologique. Après avoir réussi le couplage de l'océan et l'atmosphère, les modèles climatiques intègrent désormais les processus chimiques et biochimiques. On a pu ainsi modéliser la perte de l'ozone stratosphérique et on peut maintenant étudier le cycle du carbone dans la géosphère. L'océanographie est en train de faire un pas considérable en passant à la phase opérationnelle qui permettra de connaître à tout instant l'état de l'océan, à l'instar des analyses météorologiques, et d'en prévoir l'évolution. Dans le même temps, des processus nouveaux viennent sur le devant de la scène comme le couplage entre turbulence et biologie dans l'océan. Ils posent des problèmes de nature très fondamentale et doivent être étudiés comme tels, avec des besoins très spécifiques. Ces progrès en modélisation ont été rendus possibles par le développement de l'interdisciplinarité, du travail en équipe et par l'accroissement considérable du niveau de compétence en modélisation dans les laboratoires. Il a aussi été porté par l'augmentation rapide de la puissance des calculateurs numériques qui a depuis 50 ans été liée aux progrès de la météorologie puis, plus récemment, de l'océanographie.

Si la modélisation, numérique ou conceptuelle, fait de grand progrès, les sciences de l'environnement reposent également sur l'observation qui devient elle aussi de plus en plus complète et de plus en plus structurée

Elle comprend quatre axes complémentaires, les observations satellitales, les réseaux de mesure, les campagnes coordonnées et l'expérimentation en laboratoire qui répondent à plusieurs nécessités. La surveillance globale d'un nombre croissant de paramètres est assurée par les satellites qui permettent, par exemple, de connaître globalement le niveau des mers, la distribution de température de l'atmosphère ou le contenu de chlorophylle dans la couche de surface de l'océan. La quantité de données de provenance satellitale est appelée à croître très fortement au cours des prochaines années avec l'arrivée de nouveaux instruments à haute résolution spatiale et temporelle. Le développement et l'exploitation des instruments satellitaires sont conduits en collaboration étroite avec le CNES et les autres agences spatiales.

Les réseaux de mesure permettent un suivi systématique de la variabilité d'un certain nombre de paramètres

Ce sont, par exemple, les mesures biologiques dans l'océan ou de composition chimique de l'atmosphère. Ils sont souvent partie d'un réseau international. Les campagnes de mesure visent à documenter des processus par une série d'observations ciblées et coordonnées qui font intervenir un ensemble de moyens et d'instruments. Elles sont elles aussi généralement internationales. L'expérimentation ou la mesure en laboratoire permettent d'étudier isolément des processus sur des modèles, par exemple en biochimie, ou de déterminer les constantes physiques ou chimiques nécessaires à la modélisation.

L'utilisation des données par la modélisation passe par les techniques d'assimilation, domaine où les équipes françaises sont leader

Tout un champ d'applications nouvelles est en train de s'ouvrir avec l'assimilation des données océaniques et des mesures chimiques. Les campagnes elles-mêmes sont organisées en couplage avec la modélisation. Pendant la campagne, il est habituel que la flotte des moyens mobiles converge vers les lieux intéressants indiqués par les modèles numériques. L'exploitation des données se fait toujours en comparaison avec les résultats des modélisations pour y tester de nouveaux processus ou de nouvelles représentations des processus. Les campagnes et les réseaux d'observation reposent sur les moyens que l'INSU et ses partenaires, notamment le CEA, le CNES, Ifremer, l'IRD, Météo France, développent et mettent à la disposition de la recherche. Parmi ces moyens, les avions de recherche et les bateaux océanographiques sont des outils coûteux mais indispensables pour apporter les instruments d'observation sur les lieux des phénomènes.

L'INSU s'attache à ce que les données recueillies par les réseaux ou les campagnes soient rendues accessibles à la communauté scientifique.

L'observation n'est pas seulement un moyen d'améliorer les modèles ou de les alimenter en données. Elle reste la voie de l'exploration et de la découverte. Celle du trou d'ozone date de

1985 et fut le résultat d'observations systématiques. Avant 1989, on ignorait les espèces microscopiques qui constituent 30 % de la biomasse océanique. Les progrès de l'analyse géochimique ont permis au cours de la dernière décennie de découvrir les fluctuations rapides du climat dans le passé.

Il reste encore beaucoup de place pour la découverte, que ce soit pour les processus biochimiques où l'exploration est loin d'être terminée ou même sur des questions réputées connues (on ne sait toujours pas, par exemple, ce qui détermine la largeur de la bande de convergence intertropicale)

Sur beaucoup de points, les réponses actuelles sont incomplètes et donc susceptibles d'être remises en cause. L'observation intensive et la construction de modèles de plus en plus complexes se font en interaction avec toute une série d'études fondamentales dans un étroit réseau de motivations et dépendances.

Afin d'organiser l'ensemble des efforts et des moyens, l'INSU, en coopération avec ses partenaires s'est doté d'un ensemble de programmes nationaux dont l'objectif est double

Ils offrent d'une part un lieu de réflexion pour définir les projets scientifiques fédérateurs et les moyens nécessaires à leur accomplissement, et permettent d'autre part d'inciter les équipes à travailler autour des thèmes fédérateurs. Le fonctionnement par appel d'offre et examen des projets par un comité scientifique permet d'assurer la souplesse et la transparence nécessaires. Tout en tenant compte des spécificités intrinsèques de notre communauté, cette organisation a permis de structurer progressivement la contribution française à l'effort de recherche international selon les axes définis par le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) et le Programme International Géosphère Biosphère (PIGB). Dans un grand nombre de domaines, les équipes françaises ont montré qu'elles se situaient au meilleur niveau et ont joué un rôle moteur dans la mise en oeuvre de grandes campagnes internationales, dans le développement de nouvelles approches spatiales ainsi que dans l'effort international d'inter-comparaison dans les domaines de la modélisation climatique et de l'observation à long terme de l'environnement planétaire.

L'INSU encouragera la recherche plus systématique de partenaires internationaux afin de réunir les moyens et les compétences complémentaires de celles des équipes françaises autour des grandes expériences et d'ouvrir l'accès à certaines grandes expériences étrangères à ces équipes

Sur le plan Européen, les PCRD (Programmes Cadres de Recherche et Développement) successifs ont joué un rôle positif dans la structuration de la communauté à l'échelle européenne. Les programmes Environnement et Climat et MAST (Marine Science & Technology) ont permis de réaliser des projets de plus grande envergure qu'il n'aurait été possible de le faire à l'échelle nationale (Campagnes sur l'ozone Arctique par exemple) et de constituer des réseaux

de laboratoires qui perdurent au-delà des projets. Dans ce contexte, on peut cependant regretter l'absence de pérennité des programmes et un manque de concertation avec les approches nationales qui a rendu l'approche européenne souvent parcellaire et peu cohérente par rapport à celle de la NSF (National Science Foundation - USA). Un point positif est l'évolution actuelle vers la création d'un Espace Européen de la Recherche et la montée en puissance d'une organisation comme la Fondation Européenne de la Science (ESF) qui devrait jouer un rôle majeur au niveau communautaire en favorisant des Programmes Européens de Recherche en Coopération (EUROCORES) via la coordination d'appels d'offres inter-organismes.

La programmation de la recherche ne doit pas aller à l'encontre de la réactivité

Il importe donc que le contenu des programmes et les programmes eux-mêmes se renouvellent en fonction des nouveaux problèmes. Il importe aussi qu'une part notable de la recherche se fasse hors des programmes. C'est ainsi que des mesures incitatives ont été prises à l'intention des jeunes chercheurs pour leur donner les moyens de développer de nouvelles thématiques.

La demande sociale sur les sciences de l'environnement s'exprime de manière multiple, allant de problèmes entraînant des choix de société à de simples problèmes de gestion des ressources locales

Sur l'ensemble des problèmes posés, le devoir des scientifiques est d'offrir leur expertise tout en précisant les limites, ce qui n'est pas toujours aisé. Cette expertise sera de plus en plus demandée pour les questions liées à la gestion de l'environnement (ressources en eau, pollution de l'eau et des océans, milieu côtier, impact du réchauffement climatique...). Par ailleurs, les négociations internationales sur les questions d'environnement et les débats sur le développement durable ont mis en évidence la nécessité d'intégrer, dans les processus de décision, des expertises scientifiques de différents domaines ainsi que des contributions venant des différents acteurs privés ou associatifs. Ces nouvelles thématiques réclament un effort constant de recherches et d'analyses, une information, une mise en perspective et un niveau d'expertises techniques qui ne peuvent être assurés par l'administration "gouvernante". Réciproquement, les institutions scientifiques et les différentes structures de recherche ont de grandes difficultés à s'insérer dans le dispositif de décision publique. Au-delà des actions individuelles des laboratoires et des équipes sur les problèmes d'expertise locale, l'INSU devrait s'efforcer de s'insérer dans des structures d'interface ayant vocation à traiter des problèmes d'environnement. Celles-ci, en s'appuyant sur des réseaux de recherche pluridisciplinaires et d'autres lieux d'accumulation des compétences, devront créer un cadre rassemblant acteurs de la décision publique, scientifiques mais aussi acteurs privés ou associatifs, en vue de faire émerger les questions stratégiques pertinentes. En retour, de nouveaux thèmes de recherche seront définis, dont les scientifiques pourraient se saisir sans délai. La mise en oeuvre de tels dispositifs d'interface impliquerait nécessairement que l'activité d'expertise soit mieux prise en compte dans l'évaluation, aussi bien individuelle des chercheurs que collective, au niveau des équipes et des laboratoires. L'histoire nous apprend que le sort des sociétés antiques était lié aux caprices du climat avant que l'homme soit devenu lui-même capable de modifier l'environnement planétaire. Cette dépendance n'est que plus vraie aujourd'hui et il convient

d'étudier de façon approfondie l'interaction des sociétés avec l'environnement, au niveau des émissions, des ressources, des sols comme du paysage. Pour ce faire, la collaboration est indispensable avec les spécialistes des sciences de l'homme. Un chantier particulièrement important est d'étudier dans quelle mesure les sociétés peuvent s'adapter au changement climatique en complément des mesures visant à le combattre. A l'heure actuelle, les efforts engagés en France ne sont pas à la mesure du défi. L'intérêt du public et des responsables envers l'environnement a été essentiellement suscité par les mises en garde provenant de la communauté scientifique. Une part importante de la demande sociale réside donc dans le besoin d'information et d'éducation du public sur les milieux naturels. Les scientifiques y répondent généralement individuellement, certains y engageant beaucoup d'énergie. Il n'est pas sûr que les organismes de recherche accordent suffisamment d'attention à cette activité.

Le développement de la recherche passe aussi par la formation des étudiants

La plupart des laboratoires sont très imbriqués dans le tissu universitaire. Cependant les sciences de l'environnement restent perçues comme un domaine d'application et ne font pas encore vraiment partie de la culture scientifique de base, probablement en partie parce que les structures éducatives ont du mal à prendre en compte un domaine aussi transversal.

Le Comité de pilotage

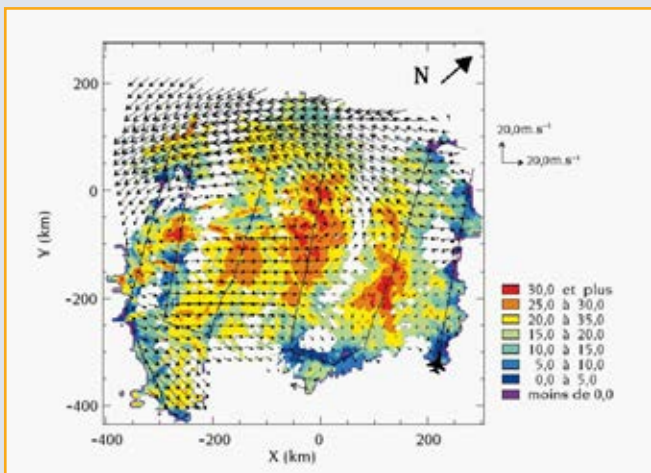
météorologie

nuages

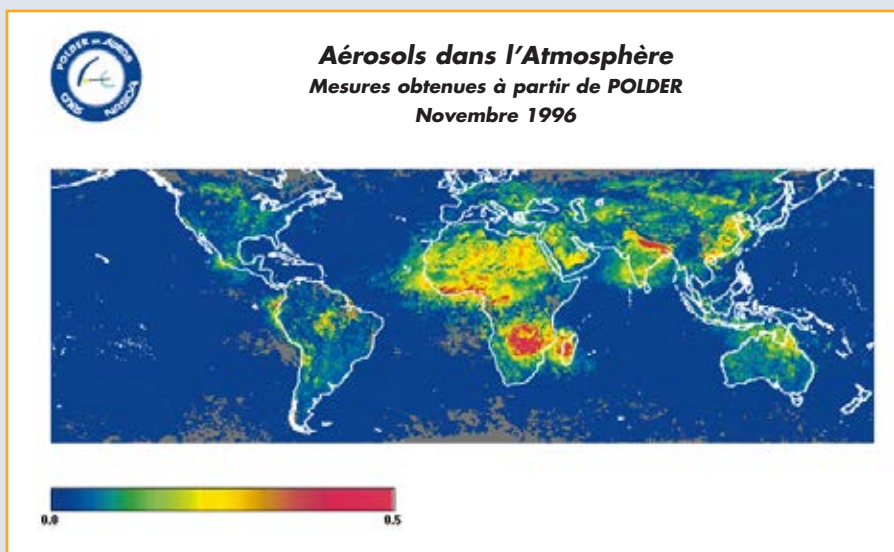
L'atmosphère

ozone

pollution

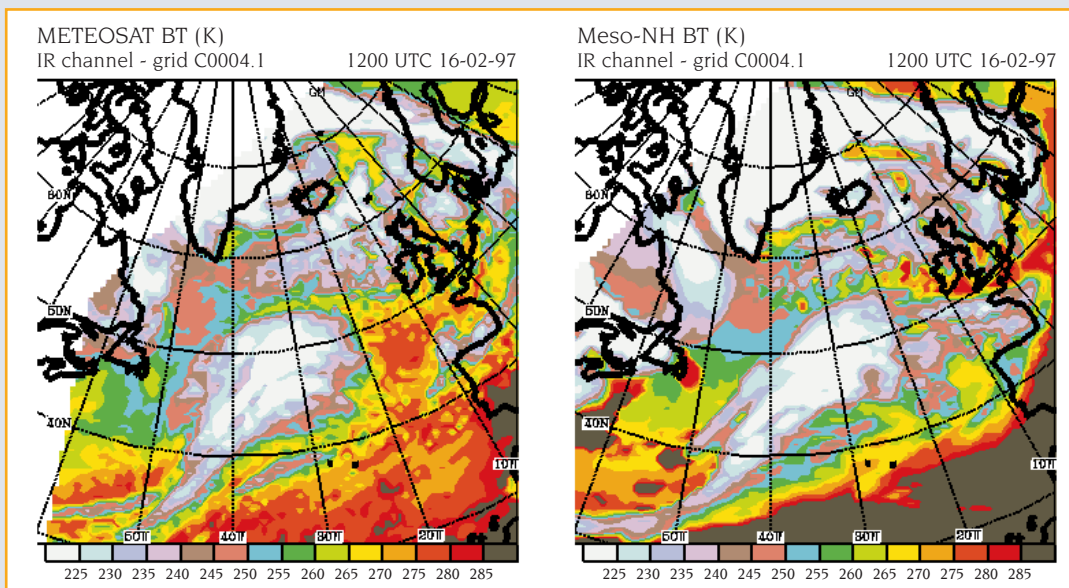


Champs de vents horizontaux (vecteurs) et de précipitations (couleurs) déduits des observations par radars Doppler aéroportés lors de l'expérience FASTEX. La circulation cyclonique associée aux cyclones extratropicaux (tempête du 17 février 1997) est clairement identifiée. (CETP/CNRS/UVSQ)



Aérosols dans l'Atmosphère
Mesures obtenues à partir de POLDER
Novembre 1996

Valeur moyenne mensuelle du contenu en aérosols dans l'atmosphère, obtenue à partir des mesures de l'instrument satellitaire POLDER pour le mois de Novembre 1996. (CNES/NASDA - Traitement : LOA/LSCE)



Vues de la tempête de FASTEX (CSS) dont le développement a été le plus explosif : image METEOSAT observée dans le canal infrarouge thermique (gauche) et image synthétique recalculée à partir d'une simulation de 24 heures du modèle météorologique Meso-NH (droite). L'accord obtenu entre l'image synthétique recalculée et l'observation satellitaire est désormais suffisamment bon pour identifier et discuter les limites des schémas microphysiques utilisés dans le modèle. (LA/OMP/CNRS)

Les enjeux de la recherche

Les objectifs de la recherche atmosphérique sont principalement :

- ▶ la compréhension des processus de transfert et de transformation d'énergie qui déterminent l'évolution du milieu atmosphérique, interagissent avec l'évolution météorologique et climatique et conditionnent leur prévisibilité ;
- ▶ la compréhension des processus qui conditionnent la composition de l'atmosphère en gaz et particules et tout particulièrement les composants liés à son pouvoir oxydant et à ses propriétés radiatives.

■ Ces objectifs de recherche se trouvent en amont et contribuent fortement aux besoins d'amélioration des prévisions météorologiques et climatiques. La tendance actuelle vers les études de petite échelle permet en outre d'aborder plus efficacement que par le passé des questions d'intérêt sociétal : l'étude des divers risques naturels engendrés par l'atmosphère (tempêtes, inondations), la qualité de l'air, la prévision à l'échelle locale,...

Bilan des connaissances et place de la communauté française

En physique de l'atmosphère

Les principaux processus physiques atmosphériques ont été identifiés et analysés depuis plusieurs décennies, mais l'amélioration des modèles météorologiques (modèles opérationnels et de recherche) conduit les équipes à réexaminer ces processus pour quantifier plus précisément leurs effets, affiner les paramétrisations sous maille, nécessaires pour la modélisation climatique, et évaluer les transports des constituants chimiques dans l'atmosphère. La communauté française est bien structurée grâce, en particulier, à l'action fédératrice du programme PATOM, ce qui lui a permis d'apporter des contributions significatives et de jouer un rôle reconnu au niveau international.

■ L'atmosphère météorologique

En ce qui concerne les processus physiques et dynamiques :

- ▶ nous connaissons beaucoup mieux, sur le plan quantitatif, les effets des montagnes sur l'atmosphère. La paramétrisation du relief dans les modèles de climat et de prévision numérique a été réévaluée grâce aux résultats de l'expérience dédiée PYREX ;
- ▶ les résultats de l'expérience FASTEX, les mesures sous ballon et les recherches fondamentales ont permis des progrès notables dans la compréhension et la modélisation des ondes de gravité ;
- ▶ la paramétrisation des flux turbulents à la surface marine a été revue suite aux expériences en mer à moyenne échelle SEMAPHORE et TOGA/COARE ;
- ▶ la compréhension des systèmes convectifs tropicaux a été améliorée ainsi que leur interaction avec l'océan

sous-jacent et l'organisation à différentes échelles de ce système (expérience internationale TOGA/COARE) ;

▶ on a progressé dans la définition des zones sensibles, pour la prévisibilité à trois jours, grâce à l'expérience FASTEX. Les scores de prévision avec les observations adaptatives, assimilées par la méthode d'assimilation variationnelle 4D sont significativement meilleurs que les scores standard ;

▶ grâce à des développements instrumentaux dans le domaine des capteurs microphysiques (Fast FSSP) et des lidars (Leandre 1, 2), soutenus par des développements théoriques de premier plan, on maîtrise les moyens d'une approche intégrée des systèmes nuageux.

■ La stratosphère

Les connaissances sur les processus agissant dans la stratosphère ont réellement progressé. On a compris le rôle des ondes comme moteur de la circulation de Brewer-Dobson ainsi que les processus expliquant l'existence des barrières dynamiques des régions subtropicales et polaires. L'importance du transport le long des surfaces isentropes dans les subtropiques et aux moyennes latitudes a été reconnue et a beaucoup modifié notre vision des échanges entre la troposphère et la stratosphère. Il reste néanmoins à faire un effort important pour quantifier ces processus. Des mesures en ballon *in situ* et des études en laboratoire ont permis d'avancer dans la compréhension des interactions entre les ondes et la turbulence, tout particulièrement dans la basse stratosphère. La compréhension de la microphysique des nuages stratosphériques polaires (PSC) a aussi beaucoup progressé (formation, destruction, phase liquide ou solide...).

• L'atmosphère

■ Le cycle de l'eau

L'importance de l'eau sous ses différentes formes (vapeur, nuage, pluie, eau du sol) a été mieux quantifiée, tant pour son rôle dans les processus (condensation/évaporation dans l'atmosphère en lien avec la dynamique, échanges de chaleur en surface), que pour son rôle sur les échanges radiatifs.

■ Le tourbillon potentiel

Le "tourbillon potentiel" est un concept de plus en plus utilisé pour comprendre les processus. Autrefois utilisé uniquement par les spécialistes de cyclogenèse et frontogenèse, il est maintenant largement utilisé en couche limite, dans les écoulements sur relief et dans la stratosphère.

■ La révolution de l'assimilation de données

Grâce aux méthodes variationnelles, on a acquis la capacité d'assimiler des observations de différentes origines. Le progrès est surtout sensible pour les observations satellitales.

■ L'observation satellitale

Le développement de l'observation satellitale notamment en micro-ondes constitue la principale évolution dans le domaine de la mesure : les instruments actifs et passifs permettent le suivi de l'eau atmosphérique et de paramètres de surface importants pour les échanges surface-atmosphère (humidité des sols, vent à la surface océanique).

En chimie atmosphérique

Dans la dernière décennie, on peut souligner, au niveau international, l'émergence de trois thèmes phares :

- ▶ l'évolution saisonnière de l'ozone stratosphérique ;
- ▶ l'importance planétaire de la chimie troposphérique dans les zones tropicales plus ou moins anthropisées (P. Crutzen, prix Nobel en 1997, a illustré l'importance des Tropiques en les qualifiant de machine à laver planétaire, avec pour lessive les radicaux OH) ;
- ▶ l'étude des mécanismes de pollution atmosphérique d'origine anthropique et leur contribution au bilan global de l'atmosphère.

■ Au plan français, le PNCA a permis la coordination des recherches conduisant ainsi à l'émergence de thèmes qui n'existaient pas en France (en chimie hétérogène en particulier) ou au renforcement de pôles déjà existants.

■ L'ozone stratosphérique

Les mécanismes de destruction photochimique de l'ozone stratosphérique sont maintenant mieux compris grâce, en particulier, à l'apport des campagnes aéroportées pilotées par les américains. Il faut signaler aussi les avancées dans le domaine arctique, grâce à une série de campagnes de mesure organisées à l'échelle européenne (EASOE, SESAME, THESEO), avec une forte participation française. La modélisation globale de la chimie stratosphérique est également un point fort de la communauté française.

■ Le rôle des nuages stratosphériques polaires dans l'activation des espèces chlorées, destructrices de l'ozone, par des processus de chimie hétérogène est maintenant bien établi. L'observation satellitale (en particulier UARS) de nombreux gaz en traces a également représenté un apport indéniable pour la compréhension de la chimie stratosphérique

et des processus de transport et pour l'établissement d'une climatologie de ces gaz. La combinaison des observations d'ozone aux hautes latitudes (en particulier de POAM-II et -III à bord de SPOT-4 et -5) et des modèles de chimie-transport permet d'estimer l'évolution saisonnière et inter annuelle de la destruction chimique d'ozone dans le vortex. Au moment où la charge en chlore de l'atmosphère atteint son maximum, il reste cependant nécessaire de continuer la surveillance de l'ozone stratosphérique et des conséquences de son évolution sur le climat et le rayonnement UV au niveau du sol.

■ Néanmoins certains points restent mal quantifiés comme le rôle des composés bromés, la distribution des nuages stratosphériques, leur nature (composition et phase) et leur efficacité dans la destruction de l'ozone polaire. Aux moyennes latitudes, les effets compétitifs de destruction *in situ* par les composés halogénés et d'échange avec les autres régions de l'atmosphère doivent également être mieux quantifiés. La chimie des oxydes d'azote, destructeurs d'ozone dans la stratosphère mais producteurs dans la haute troposphère pose aussi des problèmes : leur concentration dans les modèles est largement sous-estimée et sans que l'on comprenne la cause de cette incohérence.

■ La chimie troposphérique

De nombreux programmes, souvent coordonnés par IGAC, ont permis d'organiser des campagnes de mesures en Afrique, Amazonie et en Asie pour évaluer :

- ▶ les émissions naturelles de gaz et de particules de différents écosystèmes (savanes, forêt, désert). La contribution française a été significative dans l'évaluation des sources de gaz et particules carbonées par les combustions de biomasses par les savanes et feux domestiques en Afrique (projets DECAFE et EXPRESSO) ;
- ▶ le rôle radiatif et puits chimique des aérosols minéraux des zones désertiques ou semi-arides et des particules carbonées d'origines naturelles, de combustions fossiles ou de biomasses. Les équipes françaises ont obtenu des résultats significatifs sur les émissions d'aérosols par érosion éolienne et largement participé à l'expérience internationale INDOEX.

■ Cependant, malgré les efforts de la communauté internationale, notamment grâce à POLDER, il n'existe pas encore de suivi global des composés troposphériques. De plus, peu d'études ont été entreprises sur le rôle de la convection profonde sur la redistribution des espèces chimiques dans la troposphère et la stratosphère. Ce thème sera certainement le défi à relever par la communauté internationale dans la prochaine décennie.

■ La pollution atmosphérique

Ces dernières années, on a constaté une sensibilisation croissante aux effets de la pollution atmosphérique d'origine urbaine sur la santé. Ce sont des problèmes qui avaient été d'actualité il y a quelques dizaines d'années avec la pollution à partir des composés soufrés. Cette sensibilisation a conduit à développer des études de chimie atmosphérique en milieu pollué et à se poser la question de la prévisibilité des pointes de pollution. Des résultats essentiels concernent le rôle des composants organiques volatils (VOC) dans les cycles chimiques conduisant aux polluants secondaires comme l'ozone dans l'étude de la pollution atmosphérique.

■ La communauté française a abordé ce thème avec un certain retard par rapport à la communauté internationale et c'est surtout le Ministère de l'Environnement et l'ADEME qui ont été les premiers à soutenir ce domaine. L'effort réalisé a permis de démarrer des études expérimentales et par modélisation numérique sur différentes régions (ESQUIF en région parisienne, O3O en région toulousaine, ESCOMPTE

dans la région de Marseille). Toutes ces études ont permis d'améliorer nos connaissances sur cette forme de pollution et de mieux la représenter dans des simulations numériques. Il faut signaler que les études sur la pollution par les particules (aérosols), qui est probablement la plus néfaste au niveau de la santé, nécessite encore d'importants développements.

Les axes prioritaires

Il est de tradition de considérer deux grands domaines dans la recherche atmosphérique : d'une part, les études à caractère physique et dynamique, liées à la météorologie à différentes échelles, et d'autre part, les études sur la chimie atmosphérique, c'est-à-dire principalement sur la composition atmosphérique et son évolution.

■ Une des évolutions les plus sensibles ces toutes dernières années est la mise en évidence des couplages forts existant entre les deux domaines et la nécessité d'engager des actions de recherche en commun. Ceci est surtout vrai pour la chimie atmosphérique, dont la compréhension nécessite très souvent l'apport des processus de dynamique et de transport.

Six axes de recherche prioritaires ont été dégagés pour les années à venir.

Appréhender la prévisibilité

Les modèles numériques, qui traduisent nos connaissances à un moment donné sous la forme d'algorithmes, ont atteint un très grand degré de réalisme. Ils peuvent simuler avec succès un vaste ensemble de phénomènes avec nombre de détails et de sous-structures, fruits d'un patient travail tant numérique que physique. On prend rapidement conscience que le succès d'une simulation est loin de se réduire au choix heureux d'un jeu d'équations et de paramétrisations et à celui d'une résolution. Les exemples se multiplient d'expériences décrivant ou non tel ou tel phénomène réel à la suite de modifications tout juste perceptibles dans les conditions initiales (ou les conditions aux limites), sans modification aucune du modèle lui-même.

■ Ce comportement, connu depuis de nombreuses années pour la prévision du temps, touche toute la gamme des phénomènes atmosphériques et climatiques : les échelles saisonnières avec le phénomène El-Nino, l'échelle synoptique avec les cyclogenèses et les transitions de régime, ou les petites échelles avec la convection. En fait, tous les systèmes dynamiques abordés dans l'étude de l'océan, de l'atmosphère ou

de la biosphère sont concernés et cette question devra être traitée pour chacun des domaines. Si de plus en plus de chercheurs se trouvent ainsi confrontés au problème de la prévisibilité, il n'est pas toujours aisé de la caractériser, de la définir de manière quantitative, d'en comprendre la nature ou encore moins d'en prévoir les effets.

■ La prévisibilité est une propriété d'un système dynamique, par exemple de l'atmosphère, qui dépend de l'espace et du temps. Pour un modèle, c'est une propriété intrinsèque qui doit pouvoir être estimée et cartographiée. Elle n'est pas améliorable, mais elle doit être exploitée en repensant et améliorant les systèmes d'observation pour réduire l'incertitude sur les données les plus sensibles. Ceci constitue un premier enjeu important.

■ Au-delà, on voit bien que, avec la prévisibilité, se pose la question fondamentale de la pertinence de l'approche déterministe pour décrire l'évolution des systèmes complexes comme l'atmosphère, l'océan, la biosphère. Une approche plus probabiliste peut s'avérer nécessaire pour traiter l'ensemble des incertitudes, y compris celles qui sont introduites par les approximations et les paramétrisations des modèles. Ceci conduit à de nouveaux développements concernant la modélisation, l'assimilation et les observations.

■ Au niveau de la communauté française, le sujet est en plein renouveau. Au cours de la campagne FASTEX, une stratégie d'observation adaptative a pu être mise en œuvre en s'appuyant sur un outil très flexible d'analyse de la prévisibilité. Les travaux préliminaires de la campagne MAP (Mesoscale Alpine Programme) et l'étude de situations choisies au moyen de modèles très détaillés comme MESO-NH, ont été l'occasion, pour la communauté de modélisation à moyenne échelle, de se familiariser avec cette démarche. Sans doute un des meilleurs atouts de la communauté française sur cette question est-il son expertise en assimilation de données, issue du Groupement de Recherche sur les Méthodes Variationnelles. Il existe aussi un grand nombre de connaissances en mathématiques appliquées ou en sciences de

l'ingénieur (notamment pour le contrôle des systèmes chaotiques ou incertains) qui n'ont pas encore été suffisamment exploitées et requièrent un effort théorique au sein de notre communauté.

■ L'océanographie a déjà été confrontée au problème de la prévisibilité pour El Niño. Un projet comme MERCATOR sera l'occasion de l'aborder dans les mêmes termes qu'en météorologie.

Comprendre le rôle des nuages dans le système atmosphérique

Le rôle joué par les nuages dans le système climatique reste une source majeure d'incertitude comme en témoignent les écarts modèles/observations (prévisibilité d'événements extrêmes notamment), l'intercomparaison des modèles eux-mêmes. Du point de vue de la composition chimique de l'atmosphère et de sa relation avec le climat, les nuages jouent également un rôle important en transformant de nombreuses espèces chimiques. Leur étude nécessite une approche multi-échelles et multidisciplinaire.

Trois domaines d'investigation restent encore particulièrement critiques.

■ L'impact des nuages sur le bilan radiatif et les variations thermodynamiques

L'objectif essentiel est la compréhension physique des interactions nuage-rayonnement en vue de l'amélioration, d'une part, de leur représentation dans les modèles de climat, et d'autre part, dans la restitution des propriétés radiatives et physiques des milieux nuageux à partir de données satellitaires et aéroportées.

■ L'interaction nuages-aérosols

Les processus de nucléation homogène et hétérogène comportent encore de grandes incertitudes, en particulier pour les noyaux glaçogènes. Le cas de la formation des sulfates par oxydation du SO₂ en phase liquide est bien connu, mais de manière générale, la réactivité en phase aqueuse reste encore trop mal documentée en particulier pour les espèces organiques. Il est également nécessaire de quantifier les produits (gaz et aérosols) d'évaporation et/ou sublimation des nuages (cirrus, enclumes des nuages convectifs, nuages orographiques). En particulier, la caractérisation des surfaces de ces aérosols formés après évaporation (composition, structure, réactivité) est nécessaire pour estimer leur potentialité à agir comme de nouveaux noyaux de condensation.

■ L'impact de la chimie multiphasique sur la redistribution des gaz réactifs en phase gazeuse

Les particules condensées se présentent sous différentes formes et engendrent une chimie très complexe qui requiert des études en laboratoire, des campagnes sur le terrain et des modélisations numériques. Schématiquement, les interactions entre la phase gazeuse et les aérosols liquides ou solides peuvent constituer un puits significatif pour certaines espèces gazeuses et une source pour celles qui sont issues des réactions chimiques en phase aqueuse ou des réactions à la surface des aérosols.

Comprendre le rôle de l'interface troposphère-stratosphère

La stratosphère et la troposphère interagissent dynamiquement. Cette interaction a d'importantes conséquences sur l'équilibre climatique (flux solaire atteignant la surface et flux infrarouge émis par la stratosphère, propagation des ondes forcées dans la troposphère et contrôle de la circulation au voisinage de la tropopause par les perturbations dynamiques liées à l'activité ondulatoire dans l'atmosphère moyenne). Elle a également des conséquences importantes sur la destruction de l'ozone polaire (température des régions polaires, humidification de la stratosphère). La principale question qui devra être traitée sera de déterminer le rôle respectif des barrières dynamiques et des mécanismes chimiques dans l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère dans la zone d'altitude 8-18 km.

■ Phénomènes dynamiques

Pour la compréhension des phénomènes dynamiques, deux aspects de cette interaction apparaissent comme prioritaires :

- ▶ la structure de la tropopause (hauteur, distribution méridienne) qui détermine par exemple la température de tropopause tropicale et les concentrations de vapeur d'eau stratosphérique et donc la chimie de la basse stratosphère ;
- ▶ le transport et le mélange des espèces chimiques dans la stratosphère et la haute troposphère.

■ Évolution de la composition chimique

Pour la compréhension de l'évolution de la composition chimique, l'effort devra porter prioritairement dans deux directions :

- ▶ une connaissance la plus précise possible de la composition particulière de la haute troposphère et de la basse stratosphère;
- ▶ la connaissance de la répartition des espèces chimiques en phase gazeuse entre espèces actives et espèces réservoirs dans les différentes familles, qui conditionne fortement l'influence de celles-ci sur la destruction d'ozone dans la stratosphère et la production/destruction d'ozone dans la haute troposphère.

■ Après les efforts consentis ces dernières années pour comprendre le processus de destruction de l'ozone stratosphérique en région polaire, il apparaît que la priorité devrait maintenant être donnée à la compréhension des mécanismes plus incertains qui contrôlent les variations de l'ozone aux latitudes moyennes. Il est proposé d'orienter les recherches vers deux d'entre eux qui revêtent une importance particulière pour les latitudes moyennes et sont aussi les plus incertains et donc aussi les plus prometteurs :

- ▶ l'impact des régions tropicales sur la stratosphère globale. Le transport vertical dans les cellules convectives, puis la redistribution horizontale à la tropopause, contrôlent la distribution de la vapeur d'eau stratosphérique, le transfert d'espèces chimiques de courte durée de vie émises par les océans, les feux de brousse, les orages et les grandes cités des régions tropicales;
- ▶ la chimie des oxydes d'azote (Nox). Les Nox, destructeurs d'ozone dans la basse stratosphère, producteurs dans la haute troposphère, contrôlent la teneur en chlore, en brome, COV et composés hydrogénés chimiquement actifs, qui représentent le principal polluant émis par l'aviation commerciale, mais sont toujours aussi mal représentés dans les modèles photochimiques.

Dynamique des couches urbaines, pollution atmosphérique et impact à l'échelle régionale.

Il est nécessaire de focaliser prioritairement les actions de recherche dans le domaine de la pollution atmosphérique à l'échelle régionale sur l'objet environnemental que constituent les zones urbaines et périurbaines et leur lien avec l'échelle régionale. Ce choix résulte d'une part d'un manque de connaissances scientifiques sur de nombreux mécanismes qui contrôlent la pollution atmosphérique dans ces environnements sensibles et, d'autre part, d'une demande sociale qui s'accroît sur la qualité de l'air et son impact sur la santé publique.

■ Dans les zones urbaines et périurbaines, l'accent sera mis sur les actions permettant une meilleure compréhension :

- ▶ du fonctionnement des couches limites urbaines lors de la formation de couches stables permettant une forte concentration des polluants primaires à proximité du sol et des couches de mélange diurnes ainsi que les circulations associées ;
- ▶ des régimes chimiques en zone urbaine et dans le panache de la ville, c'est-à-dire la sensibilité de la production photochimique des photo-oxydants (O₃, HO₂, RO₂...) aux émissions de COV et de NO_x ;
- ▶ des processus multiphasiques et notamment de l'interaction entre la phase gazeuse et l'aérosol carboné ;
- ▶ de l'interaction chimie-aérosols-rayonnement ;
- ▶ du dépôt des polluants en zone urbaine.

Les difficultés rencontrées dans l'établissement de cadastres d'émission et surtout l'évolution dans le temps de ces cadastres, rend urgent le développement des techniques de modélisation visant à l'inversion des champs tridimensionnels de concentrations pour contraindre ces cadastres d'émission.

■ Les zones périurbaine et régionale sous l'influence des panaches de pollution peuvent être une mosaïque de végétation naturelle et terres agricoles. Il y aura donc lieu d'étudier à ce niveau la contribution des émissions biogéniques (COV, NO_x) pendant certains épisodes de pollution, contribution qui peut s'avérer significative dans l'accroissement de la pollution .

■ Si la zone urbaine constitue une source de polluants primaires et secondaires pour les échelles spatiales supérieures, elle reçoit aussi des quantités importantes de photo-oxydants depuis l'échelle régionale et continentale. Il sera donc nécessaire de favoriser les études visant à :

- ▶ déterminer l'impact de ce transport depuis l'extérieur sur les teneurs en photo-oxydants en milieu urbain/périurbain ;

▶ étudier les échanges de polluants entre couche limite et troposphère libre pour évaluer l'impact des émissions anthropiques sur la composition chimique et la capacité oxydante de l'atmosphère à l'échelle régionale ainsi que sur les flux transfrontières de polluants.

■ Les études en matière de pollution doivent s'appuyer sur les travaux de laboratoire en chimie homogène et multiphasique. Un effort est également nécessaire sur le développement d'instrumentations nouvelles (mesure de radicaux, mesures aéroportées, etc).

Appréhender la dynamique du système couplé "Continent-Océan-Atmosphère" aux échelles de temps intra saisonnières.

La variabilité atmosphérique se manifeste de façon spectaculaire aux échelles petites et moyennes (quelques heures, de la dizaine à quelques centaines de kilomètres), notamment par le développement parfois très rapide des systèmes convectifs intenses ou le creusement " explosif " de certaines dépressions. Dans ce cadre, il est nécessaire d'améliorer la compréhension et la prévision de ces événements à partir d'observations et d'expériences numériques, en identifiant les processus physiques qui contrôlent la prévisibilité.

Deux thèmes semblent particulièrement attractifs dans le cadre de l'étude de la variabilité atmosphérique : le rail des dépressions et la mousson africaine.

■ Le "rail des dépressions"

Les violentes tempêtes qui ont frappé la France en décembre 1999 montrent l'importance que revêt l'étude de la dynamique de grande échelle aux latitudes moyennes. Il est d'abord nécessaire d'insister sur la valorisation des données disponibles. Ces données fournissent une base bien étayée et largement quantitative, préalable à toute confrontation fructueuse avec les modèles théoriques. Un objectif complémentaire concerne l'élargissement de la gamme des observations assimilées, en essayant tout à la fois de représenter fidèlement les processus physiques - essentiellement non linéaires - et de respecter un degré de complexité compatible avec l'écriture d'un modèle adjoint. Parallèlement, il est indispensable d'approfondir les études théoriques :

- ▶ développer la maîtrise de l'approche basée sur le tourbillon potentiel, de préférence aux approches de type mode linéaire, généraliser les techniques d'inversion pour des hypothèses d'équilibre moins fortes;

• L'atmosphère

- ▶ prendre explicitement en compte le cycle de l'eau atmosphérique;
- ▶ évoluer vers la prévision stochastique, mieux comprendre et quantifier la prévisibilité.

De façon un peu plus prospective, on peut également s'interroger sur les relations entre les variabilités atmosphériques aux échelles intra-saisonnière, synoptique et sub-synoptique, notamment à l'aide de modèles numériques simplifiés ou équilibrés.

■ La mousson africaine

Les circulations de mousson sont conditionnées par les gradients méridiens d'énergie entre les régions océaniques équatoriales excédentaires et les zones continentales tropicales moins excédentaires ou déficitaires. Elles interagissent avec la convection profonde, souvent organisée en systèmes de moyenne échelle, principaux pourvoyeurs des précipitations dans ces régions. Les anomalies de températures de surface de la mer, de grande extension spatiale comme dans les événements El Niño, mais aussi régionales comme les événements chauds dans le Golfe de Guinée ou l'Océan Indien, exercent une influence sensible sur les moussons. Les conditions hydriques des surfaces continentales ainsi que la couverture végétale ont un impact non seulement sur le rendement pluviométrique, mais aussi sur la circulation de mousson elle-même en modifiant les gradients méridiens d'énergie ainsi que la stratification verticale de l'atmosphère. Les circulations de mousson interviennent dans le système climatique à différentes échelles. Ainsi, la circulation atmosphérique associée à la mousson ouest africaine module fortement la fréquence des cyclones ainsi que les transports de poussières au-dessus de l'Atlantique tropical nord.

L'évaluation de l'impact régional des changements climatiques

Il est maintenant clair que la composition de l'atmosphère (gaz et aérosols) a été notablement modifiée du fait des activités humaines, en particulier au cours du XXe siècle. Ces changements affectent le bilan radiatif de la planète au point qu'il est aujourd'hui acquis que le climat devrait significativement changer, sous leur influence, au cours du XXIe siècle. Même si un nombre certain d'inconnues demeurent sur l'intensité de ces changements climatiques, l'évaluation de l'impact régional sous les angles scientifique et socio-économique est un enjeu majeur de société. Cela va de l'évolution du bilan hydrique et énergétique et ses conséquences en terme d'occupation de l'espace rural, à la fréquence d'événements extrêmes (vague de chaleur, tempête de neige, tempête et tornade, développement de super cellules orageuses, grêle, etc) et leurs conséquences sur le transport, le tourisme (enneigement, ensoleillement), l'énergie, le niveau des mers.

■ Dans ce domaine, relativement nouveau malgré son importance, deux axes de recherche peuvent être dégagés : la modélisation de l'échelle globale à l'échelle régionale et les rétroactions climatiques à l'échelle régionale.

■ La modélisation de l'échelle globale à l'échelle régionale

Certains outils de modélisation sont potentiellement capables de fournir des informations sur les changements climatiques à l'échelle régionale en vue d'évaluer leur impact. Les Modèles de Circulation Générale Couplés Océan-Atmosphère (MCGCAO) étant aujourd'hui les outils les plus utilisés pour simuler la réponse climatique aux divers forçages anthropiques, une meilleure représentation de la circulation générale est donc un pré-requis nécessaire à toute évaluation plus précise des changements climatiques régionaux.

■ Cependant, leurs limitations en matière de résolution génèrent de fortes contraintes sur la pertinence des simulations, en particulier pour les régions caractérisées par des spécificités fortes ou pour des espèces dont les champs de concentration sont fortement spatialisés. Les modèles climatiques régionaux (modèles "nestés") fournissent des simulations à haute résolution pour une région sélectionnée et utilisent comme conditions initiales et limites celles qui sont fournies par un modèle de circulation générale couplé Océan-Atmosphère. Il est clair qu'une telle approche améliore considérablement la spatialisation des changements climatiques.

■ Les rétroactions climatiques à l'échelle régionale

Les émissions anthropiques modifient la composition de l'atmosphère ce qui conduit à des effets directs et indirects sur le climat à l'échelle globale et régionale. Il s'agit donc de comprendre :

▶ comment les modifications de ces distributions influencent le climat à l'échelle locale (champs de température, de rayonnement, de vapeur d'eau et de précipitations) ;

▶ comment les modifications locales du climat rétroagissent en perturbant les processus contrôlant la distribution des espèces gazeuses et particulaires via les modifications de la photochimie, les émissions de surface, le temps de vie des aérosols, etc.

■ Un effort pour mieux caractériser les sources naturelles et anthropiques de composés à courte durée de vie (gaz comme aérosols) à l'échelle régionale ainsi que leur réponse au forçage climatique est donc nécessaire. Les priorités à courte échéance doivent porter sur les NMHCs (paramétrisations des flux en fonction des variables climatiques), la production de NO par les éclairs (paramétrisation de la convection), l'aérosol carboné anthropique (projection anthropique prenant en compte les facteurs démographiques et économiques) et les poussières désertiques (projection dans le changement de l'utilisation des sols).

domaine

côtièr

L'océan

circulation.

océanique

cycles

biogéochimiques



Floraison de coccolithophoridés en mai 1998 (taches claires au large de la Bretagne et de l'Irlande). Image SeaWiFS. (NASA/GSFC)

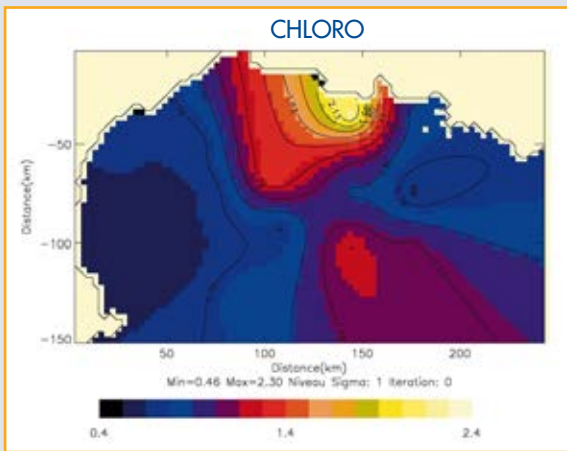
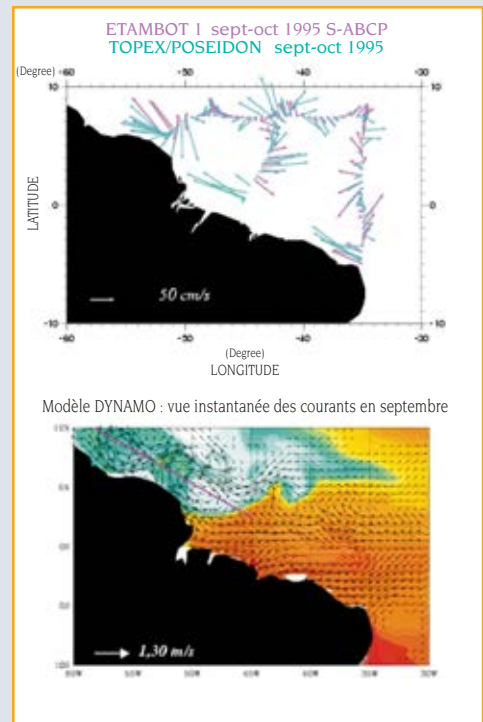
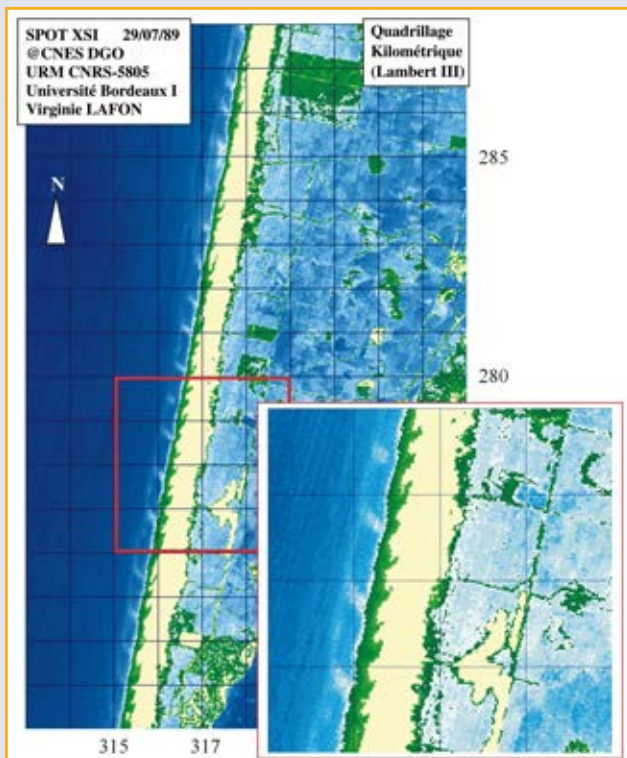


Image de la distribution superficielle de la chlorophylle dans le Golfe du Lion par le satellite Seawifs (CNRS/LOB)

Utilisation des images SPOT pour la morphodynamique des corps sableux côtiers : barres subtidales, barres et baïnes (CNRS/EPOC/Université Bordeaux 1)



Description cohérente de la circulation turbulente de l'Atlantique Equatorial Ouest par les moyens d'investigation variés mis en œuvre pendant WOCE. (1) Synthèse d'observations in-situ (campagne ETAMBOT) et satellitaire (TOPEX/POSEIDON). La modélisation pronostique (Projet DYNAMO) complète les observations, en simulant de façon réaliste la variabilité spatio-temporelle, ici (2) avec une vue instantanée des courants. (CNRS/LEGI)

Les enjeux de la recherche

Les grandes questions qui motivent les recherches en océanographie à l'aube du troisième millénaire sont la compréhension du rôle de l'océan dans la régulation du climat, dans le cycle des éléments naturels et polluants, et dans la gestion des ressources marines. Les enjeux concernent donc à la fois l'échelle planétaire et la zone côtière, directement soumise aux activités humaines. Ces recherches impliquent de comprendre le fonctionnement intrinsèque de l'océan et ses interactions avec l'atmosphère, la cryophysique, les continents et le domaine sédimentaire. Ces préoccupations font l'objet de plusieurs programmes internationaux auxquels les équipes françaises participent activement au sein du PIGB et du PMRC : CLIVAR, pour les aspects climatiques, CLIPPER pour l'océanographie opérationnelle, JGOFS pour le cycle océanique du carbone et des éléments associés, GLOBEC pour la dynamique des ressources vivantes, LOICZ pour la zone côtière, PAGES/IMAGES pour la paléocéanographie.

■ Depuis vingt ans, la recherche océanographique a subi un profond renouvellement des concepts, dû à l'arrivée des observations, soit spatiales avec un suivi continu des paramètres (tension du vent à la surface, topographie de la surface, couleur de la mer...), soit *in situ* avec l'arrivée de nouvelles instrumentations (physiques, chimiques, biologiques,...), et à l'explosion

de la modélisation numérique utilisant des résolutions spatiales de plus en plus grandes tout en incorporant un nombre croissant de processus. Cette amélioration de nos connaissances sur les circulations océaniques et la biogéochimie marine doit permettre dans les années à venir de répondre de façon de plus en plus concrète à des préoccupations d'ordre sociétal telles que le rôle de l'océan comme puits/source de CO₂ atmosphérique, les ressources vivantes, la gestion des zones côtières, la biodiversité marine. Ces progrès en recherche vont bénéficier fortement de la mise en place de l'océanographie opérationnelle qui, d'une manière similaire à la prévision météorologique, apportera à la communauté des analyses conduisant à des études plus systématiques des modes de variabilité océanique.

■ L'approche pluridisciplinaire est indispensable aux progrès en océanographie. Cette démarche a été initiée à la fois lors d'expériences *in situ* et dans les phases d'analyse des données et de modélisation. L'expérience POMME, en 2001, est un bon exemple de cette coopération entre dynamiciens et biogéochimistes. Elle doit se développer et s'étendre aux interfaces encore mal couvertes comme la liaison entre l'océanographie côtière et hauturière, ou les échanges entre la colonne d'eau et le sédiment.

Bilan des connaissances et place de la communauté française

Domaine planétaire

■ En physique et dynamique de l'océan.

Grâce à l'action du PNEDC, la communauté nationale a joué un rôle actif dans les programmes internationaux TOGA, TOGA/COARE et WOCE grâce au fort investissement national dans le spatial (TOPEX/POSEIDON, ERS) et à une implication remarquable dans les campagnes *in situ* et les programmes de modélisation. Elle a ainsi contribué de façon majeure :

- ▶ à l'analyse des données WOCE, qui ont permis de caractériser et de quantifier la circulation dans l'Atlantique Sud ;

- ▶ au développement d'un modèle réaliste de l'Atlantique, CLIPPER, en relation étroite avec les données expérimentales ;

- ▶ au développement de la modélisation couplée océan-atmosphère. Le modèle OPA est devenu le modèle communautaire des océanographes français pour la dynamique hauturière ;

- ▶ à l'exploitation des données d'altimétrie spatiale, qui ont permis de modéliser la marée océanique à l'échelle globale ;

- ▶ au développement des outils d'assimilation des données dans les modèles.

■ Pour ce qui concerne l'étude des processus à moyenne échelle, les travaux menés dans le cadre du PATOM ont

apporté des résultats importants sur :

- ▶ la compréhension de la dynamique des courants de bord-est ;
- ▶ la documentation de structures cohérentes telles que les Meddies ;
- ▶ la dynamique frontale et l'évolution de la couche de mélange au passage des tempêtes.

■ En océanographie chimique et biologique.

L'effort a été essentiellement coordonné par le programme PROOF, permettant notamment une coopération accrue entre physiciens et biogéochimistes. Ceci a largement contribué au succès des opérations en zone frontale, en Méditerranée et dans la région du courant circumpolaire Antarctique. Les principales avancées majeures concernent :

- ▶ la détermination de la production primaire de l'océan mondial et de sa variabilité spatiale inter annuelle par des observations satellitaires ;
- ▶ la mise en évidence du rôle de l'ultra-plancton en milieu oligotrophe, et de celui du micro-zooplancton dans le réseau microbien ;
- ▶ la mise en évidence du rôle clé du silicium dans la production primaire de l'océan mondial et l'exportation de carbone vers l'océan profond ;
- ▶ le rôle des organismes gélatineux dans les transferts verticaux de matière ;
- ▶ les relations entre le flux de matière organique particulaire, la dynamique du benthos abyssal et la biogéochimie des sédiments superficiels et leurs implications en paléocéanographie ;
- ▶ des développements instrumentaux (préleveurs en conditions hyperbares pour la détermination de l'activité bactérienne, suivi automatique lagrangien, grâce aux bouées Carioca, de la pression partielle de CO₂ de l'eau de surface) et analytiques (biologie cellulaire et moléculaire, traceurs isotopiques et bio marqueurs) performants ;
- ▶ une contribution forte aux séries de mesures à long terme, fondamentales pour comprendre les réactions de l'océan aux variations du climat, en Méditerranée (DYFAMED), dans l'océan Austral (KERFIX) et dans l'Océan Indien (OISO) ;
- ▶ le développement de modèles couplés physique-biogéochimie, à différentes échelles, de temps et d'espace. A l'échelle globale, la communauté française anime le projet international Ocean Carbon Model Intercomparison Project (OCMIP) du PIGB.

■ Domaine côtier

La communauté française a comblé un retard certain ces dix dernières années grâce à :

- ▶ une structuration des recherches en deux programmes nationaux, le PNEC qui intègre les recherches des 4 précédents programmes (PNOC, PNEAT, PNRCO, PNDR) et le programme LITEAU, piloté par le MATE, orienté vers la demande des gestionnaires du littoral ;
- ▶ une organisation en "chantiers" géographiques (métropole et outre-mer) qui a permis un décloisonnement des disciplines ;
- ▶ le démarrage d'un Service d'Observation du Milieu Littoral (SOMLIT).

Les résultats marquants concernent :

- ▶ la réalisation et la validation de modèles 3-D sur les grands estuaires et de modèles 3-D de circulation des masses d'eaux à l'échelle des plateaux sur les 3 façades (Manche, Atlantique, Méditerranée) ;
- ▶ le développement des études de processus associés au transport des sédiments cohésifs et non cohésifs ;
- ▶ le couplage des processus physiques et biogéochimiques à mésoéchelle ;
- ▶ le transfert, la transformation et l'assimilation des contaminants dans le continuum fleuve, estuaire, zone côtière et leur bio accumulation dans le réseau trophique ;
- ▶ les conséquences de l'eutrophisation (Baie de Seine, Nord-Bretagne, lagunes méditerranéennes) sur la gestion des apports anthropiques de sels nutritifs ;
- ▶ les processus à l'interface eau-sédiment, et particulièrement, le rôle de la bioturbation et l'évaluation de l'impact sur le cycle de la matière organique du métabolisme benthique et des flux de sels nutritifs ;
- ▶ la prise en compte explicite des processus micro biologiques dans la production, la transformation et la préservation de la matière et la mise en évidence de l'importance du picoplancton dans les zones côtières en termes de production primaire et de transfert trophique en zone littorale ;
- ▶ des avancées significatives dans le déterminisme du recrutement pour plusieurs modèles biologiques ;
- ▶ la connaissance des stratégies adaptatives du plancton toxique ;
- ▶ les cycles biogéochimiques et le fonctionnement actuel et passé des récifs coralliens en relation avec la variabilité climatique.

Les axes prioritaires

■ Domaine planétaire

■ Physique et dynamique de l'océan.

Trois grands axes de recherche peuvent être dégagés.

■ La contribution de l'océan à la variabilité climatique.

Certains aspects de la variabilité du système climatique sont spécifiques à l'océan et semblent jouer un rôle important. Dans le cadre du PNEDC et des orientations du programme international CLIVAR, l'effort de recherche portera sur :

- ▶ la variabilité de la cellule méridienne de circulation de l'Atlantique Nord et le déclenchement potentiel de changements climatiques majeurs, en particulier en Europe. Des variations importantes ont déjà été repérées dans les principaux sites de formation d'eaux profondes, mer du Labrador, mer du Groenland, mer des Sargasses. On cherchera à identifier la nature de cette variabilité, les relations de phase entre ces différents sites ainsi que le mode de propagation des anomalies vers les différentes régions et profondeurs de l'océan, l'objectif ultime étant la prévisibilité de certains modes de variabilité ;
- ▶ l'océan Austral qui est une zone d'échanges intense avec l'atmosphère

et le lieu privilégié de la redistribution de la chaleur et du sel entre les trois océans, le courant circumpolaire agissant comme une barrière dans la formation des glaces de mer. La compréhension de la variabilité nécessitera un effort particulier dans la modélisation glace-océan-atmosphère ;

► les latitudes tropicales où les principales questions à résoudre sont : l'identification des mécanismes de couplage entre différents bassins et entre régions tropicales et équatoriales, la compréhension du rôle de la variabilité tropicale dans le système climatique à l'échelle globale et l'étude de la prévisibilité des anomalies et leur impact sur la prévision saisonnière, sans oublier l'interaction d'échelles.

■ Les études de processus

L'approfondissement de notre compréhension des processus fondamentaux qui régissent le fonctionnement de l'océan est un impératif pour synthétiser les observations à l'aide de la modélisation physique et numérique et accroître nos capacités de prévision. Comme l'illustre le projet de modélisation de l'Atlantique, CLIPPER, pour l'interprétation des données des campagnes WOCE, la résolution atteinte par les modèles ne permet pas de résoudre explicitement les processus sous maille, ce qui nécessite d'étudier l'impact de tels processus sur la circulation dans les modèles de bassin. Principalement au sein du PATOM, l'effort des années à venir devra en particulier porter sur :

► les échanges avec l'atmosphère, les processus de mélange et de ventilation, la traversée de la thermocline, la convection profonde ;

► le rôle de la topographie et en particulier des talus continentaux sur l'écoulement des masses d'eaux, les mélanges diapycnaux et le devenir de grands courants et les phénomènes de mélange et d'entraînement au niveau des détroits ;

► le comportement des structures de sous-maille (fronts, filaments, etc...), et les modes de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, ainsi que leur effet sur le transport de traceurs.

■ La contribution au développement de l'océanographie opérationnelle

Les progrès dans l'observation et dans la modélisation numérique rendent possible une prévision de la circulation océanique à l'échelle des bassins. Ceci nécessitera la mise en œuvre d'un système intégré, prenant en compte simultanément les informations provenant des modèles et des données, par les techniques d'assimilation. Dans le cadre du programme international GODAE, les projets MERCATOR et CORIOLIS développent une version pré-opérationnelle de ce type de système. En amont, la communauté scientifique devra mener une réflexion approfondie sur les méthodes numériques et sur le contenu informatif des données relativement aux modèles dans lesquels elles sont assimilées. En aval, elle sera un utilisateur privilégié

des résultats du modèle opérationnel ou des outils développés dans ce cadre.

■ Biologie et biogéochimie marines

Les progrès de la mesure *in situ* ou en laboratoire ont mis en évidence une complexité croissante de cycle de la matière vivante et des éléments associés. Ceci implique de renforcer la recherche de base en biologie et chimie pour améliorer la connaissance et la régulation des processus biologiques à l'échelle de l'organisme et des populations (y compris au niveau physiologique, taxinomique et génétique) et d'intégrer cette connaissance à la description qualitative et quantitative de ces processus dans le fonctionnement des écosystèmes marins en prenant également en compte les interactions entre les différents échelons des écosystèmes et les couplages avec la dynamique océanique. L'intégration du sous-système "océan" au système "global", via les échanges aux interfaces avec l'atmosphère, les continents et les sédiments, sera aussi une priorité forte des programmes internationaux dans lesquels la communauté nationale devra jouer un rôle accru.

■ L'effort de recherche actuellement entrepris dans le cadre de PROOF devra, en particulier, permettre de :

► mieux décrire la composition et la biodiversité des communautés auto et hétérotrophes ;

► comprendre leur fonction biologique dans l'environnement marin, plus spécifiquement les processus physico-chimiques et biologiques régulant l'adaptation environnementale et leur réponse au stress, associé aux fluctuations de paramètres limitants ;

► quantifier ces fonctions biologiques en termes de flux de production, transformation et minéralisation de la matière organique dans la colonne d'eau et le sédiment récent, en élargissant cette quantification à des traceurs isotopiques mesurés *in situ* et à certains "proxys" utilisés dans les reconstructions paléocéanographiques ;

► étudier les cycles de vie des différentes espèces en tenant compte de l'hydrodynamique et des ressources nutritives ainsi que des interactions entre espèces. Ceci permettra de comprendre les processus conduisant à des changements de fonctionnement des écosystèmes dus à des effets "top-down" ;

► améliorer la représentation des relations entre les différents niveaux des réseaux trophiques dans les modèles biogéochimiques et développer la modélisation des transferts dissous-particulaire, organique-minéral et colonne d'eau-sédiment ;

► développer la modélisation couplée physique-biologie, en considérant explicitement le transfert d'échelles entre la sub-mésoséchelle et le bassin océanique. Ceci nécessitera pour la biogéochimie marine la mise en œuvre d'un système intégré modèles-observations, en développant des méthodologies d'inversion et d'assimilation de données (en particulier satellitaires) adaptées à l'estimation des paramètres dans les modèles.

■ Tout en jouant le jeu d'une forte collaboration au niveau international, la communauté nationale devra veiller à concentrer ses moyens en tirant le meilleur parti de l'existence des services d'observation du milieu marin et du développement de l'océanographie opérationnelle. A ce titre, l'océan Austral, la Méditerranée, l'Atlantique Nord-Est et le Pacifique équatorial et tropical ouest apparaissent comme des chantiers privilégiés.

Domaine côtier

Le Programme National d'Environnement Côtier (PNEC) devra renforcer son rôle fédérateur, notamment dans le cadre des chantiers (métropole et outre-mer) tandis que le PATOM devra jouer un rôle principalement ciblé sur les aspects de dynamique côtière. Tout cet effort devra non seulement s'intégrer aux réseaux et programmes de recherche internationaux mais fournir également les bases scientifiques d'une expertise nationale reconnue, en raison des enjeux économiques associés à l'utilisation de l'espace côtier et littoral. Un investissement significatif de la communauté sera nécessaire dans des programmes finalisés tels que LITEAU (MATE) parce que les problèmes d'environnement très diversifiés dans leur expression sociétale renvoient à un nombre restreint de processus fondamentaux, dont l'étude doit s'inscrire dans une prospective à dix ans.

■ La dynamique côtière

Trois priorités se dégagent pour la dynamique côtière.

■ **L'étude des processus contrôlant la circulation en zone côtière** et particulièrement les échanges avec le large doit devenir un axe fort et fédérateur, tant du point de vue de la mesure (observations classiques et nouvelles comme les flotteurs lagrangiens) que de la compréhension et de la modélisation numérique. L'effort de recherche devra porter sur les plongées d'eau dense, les upwellings de talus ou les instabilités des courants de grande échelle à l'aplomb des talus mais aussi des circulations de mésoéchelle et sub-mésoéchelle liées au vent et à la topographie, permettant ainsi de prendre en compte les échelles de temps allant de la haute fréquence à celle des variations climatiques.

Un intérêt particulier doit être porté à l'étude des forçages atmosphériques à haute résolution et ses conséquences sur la circulation côtière, particulièrement dans les zones soumises à des coups de vent intenses. Le couplage des modèles numériques atmosphériques et océaniques à

haute résolution spatio-temporelle ouvre des perspectives nouvelles pour atteindre cet objectif. Ces études permettront, en particulier, de déterminer les temps de séjour des masses d'eaux sur le plateau continental.

■ **L'étude des interfaces avec la circulation générale.** Le développement du programme MERCATOR d'océanographie opérationnelle va permettre de disposer d'analyses systématiques de la circulation générale. On pourra ainsi initialiser correctement et forcer sur des longues périodes les modèles côtiers. Dans ce contexte, il faudra développer les méthodes d'assimilation des données et l'utilisation de la télédétection (altimétrie, température, couleur de l'eau...).

■ **La dynamique sédimentaire**, dont les progrès dépendront d'une forte intégration "observation-modélisation" qui conditionne la compréhension de l'évolution du trait de côte à court, moyen et long terme.

■ Biogéochimie,

L'effort de quantification devra être poursuivi tout en intensifiant les recherches sur les aspects qualitatifs : réactivité de la matière organique, comportement des contaminants chimiques et microbiologiques, nature et rôle des espèces biologiques dans la transformation de la matière. En terme de bilan, on évaluera les apports atmosphériques actuellement sous-évalués. Une part importante des efforts devra porter sur les écosystèmes littoraux fortement diversifiés (lagunes, baies, estuaires, zones humides, cordons dunaires, écosystèmes coralliens) dont la connaissance du fonctionnement constitue la base d'un aménagement dans une optique de développement durable. Il faudra en particulier :

▶ évaluer le rôle régulateur des zones côtières vis-à-vis des cycles biogéochimiques (effet tampon face aux apports continentaux, capacités d'assimilation, seuils de disfonctionnement);

▶ permettre le maintien des habitats indispensables aux cycles biologiques de nombreuses espèces, exploitées ou non, en tant que zone de reproduction, de développement des juvéniles ou voie de migration des espèces amphihalines;

▶ évaluer les réponses, qualitatives et quantitatives, des écosystèmes côtiers aux modifications environnementales, qu'elles soient de nature climatique ou anthropique;

▶ prévoir les conséquences de changements globaux sur les écosystèmes les plus représentatifs, notamment ceux qui sont localisés à l'interface bassin versant-milieu marin, dans différents scénarii de variation du niveau marin.

hydrologie

Les surfaces continentales

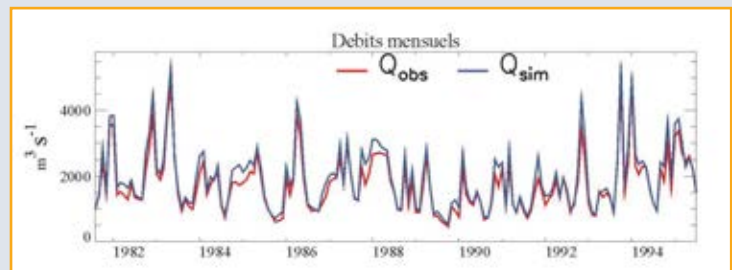
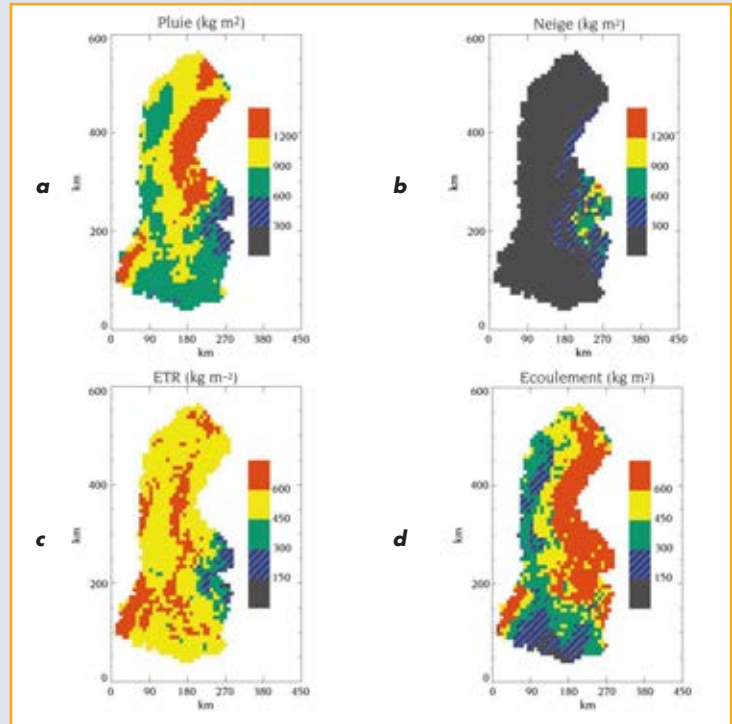
sol
végétation
atmosphère

bassin
versant



Les dernières forêts de Bornéo (Indonésie). Les études satellitales les plus récentes font découvrir l'ampleur de l'action anthropique en forêts équatoriales indonésiennes. Ici, dans la région deltaïque de la Mahakam, toute la couverture forestière originelle a disparu entre 1992 et 1998 (excepté la mangrove du delta proprement dit). La couleur rouge continue indique les vestiges de forêts dégradées. L'érosion des sols est très nette, jusque dans les charges sédimentaires côtières.
(Image SPOT 303/351 du 30 mars 1998 (60km X 60km)/CNES)

15 ans de modélisation du bilan hydrique et des débits du bassin du Rhône à l'aide du modèle Crocus-Isba-Modcou (Etchevers, 2000) : précipitations totale (a) et neigeuse (b) (moyennes annuelles sur la période 1981-1985); simulation de l'évapotranspiration (c) et du ruissellement total (d). Simulation (bleue) et observation (rouge) des débits mensuels du Rhône à Beaucaire. (Météo France/CNRM)



RUISELLEMENT EN MILIEU URBANISE

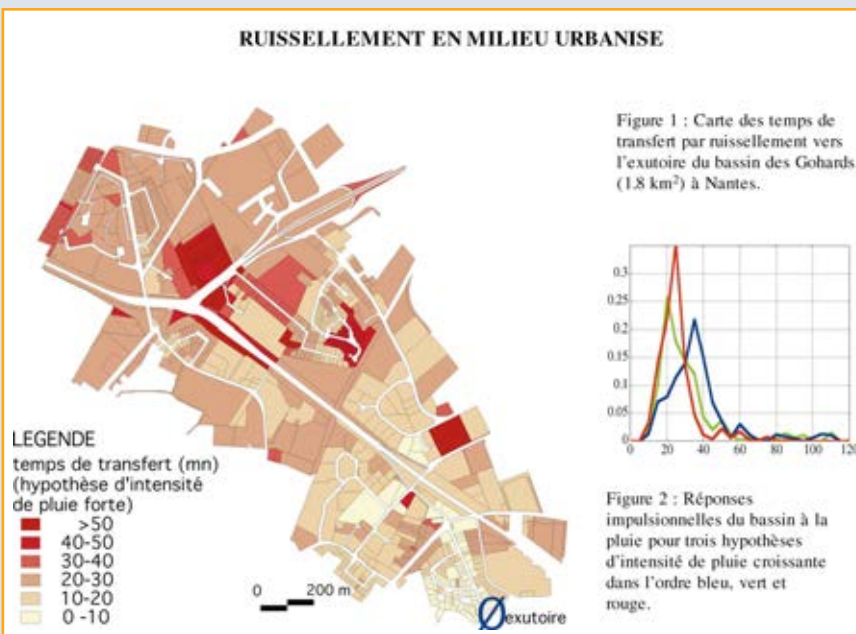


Figure 1 : Carte des temps de transfert par ruissellement vers l'exutoire du bassin des Gohards (1.8 km²) à Nantes.

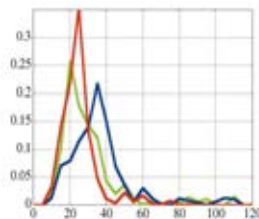


Figure 2 : Réponses impulsionnelles du bassin à la pluie pour trois hypothèses d'intensité de pluie croissante dans l'ordre bleu, vert et rouge.

Description explicite du temps de transfert des eaux de ruissellement pour chaque parcelle cadastrale (Bassin des Gohards à Nantes) - figure 1. La réaction du bassin va dépendre fortement de l'intensité de la pluie - figure 2, ce qui est contraire aux hypothèses classiquement formulées. (CNRS/LTHE)

Les enjeux de la Recherche

La surface des continents peut être vue comme :

- ▶ une interface avec l'atmosphère régulant les échanges d'eau, d'énergie, de CO₂, de divers gaz traces, et d'aérosols;
- ▶ un réseau de flux latéraux d'eau et de substances associées dans les bassins hydrologiques et hydrogéologiques, débouchant dans les zones côtières ou dans les dépressions internes, et constituant un segment majeur des grands cycles biogéochimiques;
- ▶ un domaine d'exploitation par l'homme des ressources hydriques, énergétiques et alimentaires.

Depuis des millénaires, les surfaces continentales ont subi de grandes modifications liées aux changements climatiques et d'usages du sol, au développement industriel et urbain et à l'ingénierie des milieux aquatiques. Les traces de cette évolution sont inscrites dans les sols, les archives sédimentaires lacustres, fluviales et côtières, les archives glaciaires et hydrogéologiques comme les aquifères en région semi-aride.

■ Les surfaces continentales ont donc une part héritée très importante et sur une grande partie de la planète, elles ont été et seront encore considérablement modifiées par l'action directe de l'homme. Elles peuvent être extrêmement réactives au changement climatique.

■ Le fait qu'elles soient composées de nombreux sous-ensembles aux caractéristiques physico-chimiques et biologiques différentes, constitue une extraordinaire source de questionnements scientifiques, et de difficultés, dès lors que l'on cherche à développer des approches intégrées. Au-delà de la physique, les enjeux en termes d'impacts et de développement durable sont également différents selon les milieux, qu'il s'agisse de bassins versants, de systèmes irrigués, de villes, etc...

■ Le développement des modèles globaux dépend maintenant de la compréhension des processus agissant à l'échelle régionale. La prise en compte des impacts de l'atmosphère est tout aussi nécessaire à la compréhension de l'évolution potentielle des modes de couverture des terres, de leur fonctionnement, des flux de CO₂ et H₂O, et des conséquences sur les rétroactions. Cela pose le problème des interactions entre échelles et des transferts entre écosystème naturel, agrosystème, paysage, bassin versant et région.

■ Ces différentes notions sont au cœur de la réflexion actuelle menée au sein des programmes internationaux comme le PMRC et le PIGB et dont certains aspects sont repris au niveau français par les programmes ou actions concertées.

Bilan des connaissances et place de la communauté française

Au cours de cette dernière décennie, et alors que les acteurs de la recherche publique dans le domaine concerné relèvent de nombreux organismes, la création de programmes nationaux (PNRH, PNSE), suivant en cela les recommandations des précédents colloques de prospective (Hourtin, 1993 et Poitiers, 1996 pour les communautés Océan, Atmosphère et Sciences de la Terre respectivement), la constitution de GIP multi-organismes ("Hydrosystèmes Continentaux", récemment dissous, ECOFOR) et l'instauration de groupes inter-programmes (PATOM/PNRH) ont contribué à structurer les communautés scientifiques, à favoriser le décloisonnement disciplinaire, fondement des principales avancées, et à mobiliser les équipes sur des objets ou sites communs d'études, localisés aussi bien en France métropolitaine et outre-mer que dans les Pays en développement. On retiendra plusieurs faits marquants et résultats.

Les mécanismes de transferts dans le système sol-végétation-atmosphère

Les mécanismes de transferts dans le système sol-végétation-atmosphère et la spatialisation des flux ont été étudiés depuis la feuille jusqu'au degré-carré par des biosphériciens, des atmosphériciens et des hydrologues, dans le cadre d'expériences internationales (EFEDA-Espagne, HAPEX-Sahel, SALSA-MEX, SALT, BOREAS,...) ou nationales (MUREX-Toulouse, Alpilles,...). Des modèles 3D de réflectance, liant le fonctionnement de la végétation et des mesures spatiales, ont été développés et évalués. Des schémas de surface (ISBA, SiSPAT, MAGRET, EARTH, TOPSIMPL, ...) ont été testés de manière assez exhaustive, dans différents contextes et pour certains, intégrés dans des modèles météorologiques et hydrologiques de recherche ou opérationnels.

• Les surfaces continentales

Les processus de circulation de l'eau dans les petits bassins versants

Les processus de circulation de l'eau dans les petits bassins versants (1 à 10 km²) ont été étudiés sur plusieurs sites en France (Naizin, Ringelbach, La Peyne, Bièvre-Liers, La Bassée) et outre-mer (Guyane, Cameroun). Grâce au recours plus systématique que par le passé à la géophysique de sub-surface et à la géochimie, notamment isotopique, et aux développements méthodologiques et analytiques correspondants, de substantiels progrès ont été accomplis dans la compréhension de la formation et de la propagation des écoulements d'une part, dans les mécanismes d'acquisition de la qualité de l'eau d'autre part. Malgré les difficultés rencontrées pour maintenir des sites d'observations à long terme, la communauté française commence à rattraper son retard sur ses collègues anglo-saxons qui bénéficient de tels supports expérimentaux depuis plus de 30 ans, voire 50 ans.

■ Les bassins versants des glaciers alpins et tropicaux sont utilisés comme sentinelles de changements climatiques. Par contre, alors que cette communauté contribue de façon significative à l'effort de prévision climatique à l'échelle du siècle, l'évaluation des impacts régionaux, notamment sur les ressources en eau, n'a été qu'esquissée.

La question de la variabilité spatio-temporelle des précipitations

La question de la variabilité spatio-temporelle des précipitations, qui domine l'hydrologie continentale à moyenne échelle (100 à 10000 km²), a conduit au renforcement des collaborations entre météorologues et hydrologues, aux plans de la météorologie et de la modélisation :

▶ l'utilisation à des fins hydrologiques des radars météorologiques a considérablement progressé à la fois dans le domaine des capteurs, des méthodes d'échantillonnage et des algorithmes d'interprétation de la mesure, permettant ainsi de bien meilleures représentations des champs précipitants et ce, dans des environnements aussi différents que les zones montagneuses, méditerranéennes ou sahéliennes;

▶ des modèles hydrologiques et hydrauliques ont été développés pour les bassins ruraux (TOPODYN) et urbains (CANOE) et évalués lors de différentes campagnes expérimentales;

▶ la période récente a vu une "demande hydrologique" croissante vis-à-vis du modèle atmosphérique Meso-NH, avec le démarrage de projets coopératifs et la prise en main du code par des laboratoires d'hydrologie.

L'échelle des grands bassins versants (10 000 à 100 000 km²)

Les modèles hydrologiques à base physique, établis à l'échelle des parcelles et des versants, ont été progressivement développés pour de plus grands bassins (Adour, Rhône) en couplant les eaux superficielles et souterraines (modules MODCOU ou MARTHE) à l'atmosphère (module ISBA-SAFRAN) et en prenant en compte les activités anthropiques directes (usage du sol, irrigation, barrages, etc...). Bien qu'encore susceptibles d'améliorations (paramétrisations sous-maille du ruissellement et du manteau neigeux plus performantes, description du souterrain plus fiable), ces modèles deviennent de plus en plus précis et à caractère pré-opérationnel pour la simulation des inondations, des crues, des étiages et des modifications des régimes hydriques et hydrologiques, notamment sous scénario du changement climatique (programme GICC du MATE).

■ La modélisation des flux de matières (en suspension, C, N, P, Si, ...) a été développée sur les bassins de la Garonne et de la Seine. Elle prend en compte l'ensemble des impacts agricoles, industriels et urbains exercés sur le bassin (usage du sol, intrants et rejets) ainsi que la réactivité biogéochimique des substances transportées comme l'eutrophisation, l'activité bactérienne, les échanges eau-sédiments. Ces modèles, semi-spatialisés, peuvent être couplés à ceux d'océanographie côtière, même si l'étude des interactions transversales sols/rivières/milieu côtier reste encore balbutiante et mériterait d'être renforcée.

■ les travaux sur les transferts fluviaux aux océans ont porté sur les origines lithologiques, atmosphériques et biologiques des éléments transportés et sur la spatialisation des flux, en liaison avec les impacts anthropiques. Les bases de données essentiellement françaises et les modèles de transport de matières en suspension et de carbone, permettent aux océanographes tant côtiers qu'hauturiers d'intégrer dans leurs modèles les échanges continent-océan (flux de carbone en particulier).

Les axes prioritaires

Dans les prochaines années, la communauté scientifique doit prioritairement développer les études concernant le rôle des surfaces continentales dans les cycles biogéochimiques et les impacts du changement climatique sur les ressources en eau, en sol, et sur les écosystèmes. Il convient de poursuivre et développer une approche intégrée du cycle de l'eau et des flux associés (énergie, gaz, solutés, colloïdes, particules sédimentaires) ; le milieu physique et la biosphère continentale étant réunis en une préoccupation unique.

■ Les études devront notamment concerner les échelles permettant de tenir compte de la complexité des processus et des hétérogénéités spatio-temporelles. Elles devront aussi porter sur la gestion des incertitudes des modélisations et contribuer à assurer une meilleure protection des ressources environnementales qui, dans l'optique d'un développement maîtrisé, pose maintenant la question du "comment maintenir un objectif de qualité par rapport à des seuils plus ou moins normatifs ?".

■ Enfin, les approches se doivent d'intégrer beaucoup mieux que par le passé les déterminants de l'occupation du sol, de l'utilisation des terres et de la gestion des écosystèmes ruraux et urbains, ce qui implique un renforcement des interactions entre Sciences de l'Univers, de la Vie, Humaines et Sociales, comme l'y invitent d'ores et déjà, au niveau international, les programmes PIGB et IHDP.

Renforcer les études aux échelles intermédiaires du paysage (1 à 10 000 km²)

C'est à cette échelle que les interactions atmosphère-biosphère-hydrosphère-lithosphère, qui sont influencées par la topographie, la distribution des sols et leur utilisation, sont les plus fortes. Les études peuvent bénéficier de l'évolution des moyens d'observations (satellites à haute résolution, vols instrumentés à basse altitude, radars hydrologiques...), des progrès dans les mesures locales des flux turbulents, et des nouveaux outils de modélisation météorologique, hydrologique, hydrodynamique et écologique. Elles doivent prendre en compte les espaces urbains et périurbains.

■ Un effort particulier devrait être consacré aux effets de la variabilité des précipitations sur celle des débits prenant en compte la géomorphologie des bassins, par une approche de type "climatologie hydrologique". En effet, elle constitue aujourd'hui un outil classique dans tous les problèmes d'aménagement et de prévention des risques. Demain, cette approche sera un moyen incontournable de validation des sorties désagrégées des modèles climatiques notamment pour ce qui concerne la question délicate des extrêmes dans le contexte du changement climatique.

Renforcer les études sur les couplages et interactions entre processus d'écoulement et de transport.

L'effort portera sur les interactions sols-végétation-topographie-climat et sur la dynamique de l'eau et des flux associés dans les hydrosystèmes continentaux (fleuves, lacs, aquifères, ...), ce qui implique en particulier, outre l'expérimentation fine (laboratoire, terrain) et l'observation *in situ*, le développement d'approches couplées :

► entre l'hydrodynamique et la géochimie pour mieux comprendre les chemins d'eau et garantir sa qualité;

► entre les écoulements d'eau et le transport des substances chimiques et des sédiments. A cet égard, une attention particulière portera sur les processus d'érosion depuis la parcelle jusqu'au réseau hydrographique.

Développer les études aux interfaces biosphère-hydrosphère et biosphère-atmosphère

La place de la biosphère continentale est cruciale du fait de l'influence qu'elle exerce sur les flux et pour un grand nombre de questions concernant les cycles biogéochimiques, en liaison notamment avec la problématique du changement climatique et du développement durable. Au niveau du compartiment sol, le fonctionnement dynamique des matières organiques en fonction des pratiques et du climat devrait être une priorité. L'organisation spatiale et la dynamique temporelle des couverts végétaux doivent être mieux pris en compte dans les modèles couplant la biosphère continentale et l'hydrologie et ce, aux différentes échelles.

■ La mise en place d'une action programmatique pluridisciplinaire structurant les recherches sur la biosphère terrestre et associant différents partenaires institutionnels paraît souhaitable.

Recourir plus systématiquement aux données d'observation de la Terre

Les observations spatiales multi-spectrales (missions actuelles et en projet) offrent un large champ d'utilisation dans des domaines importants et diversifiés tels que la caractérisation dynamique des états de surface du sol, incluant la végétation, l'identification des discontinuités, le suivi hydrique des sols et l'initialisation du réservoir racinaire, la documentation de la variabilité climatique intra et intersaisonnière, notamment dans les zones difficiles d'accès où les observations au sol sont rares et coûteuses. Il convient d'en accroître l'utilisation dans les modèles hydro-écologiques, soit comme données d'entrée, soit pour mieux contraindre ces derniers, dans la mesure où ils sont généralement sous-déterminés. Tout, ou presque tout, reste à faire dans le développement des outils d'assimilation des données à moyenne échelle. La communauté pourra bénéficier de l'expertise acquise par les atmosphériciens et les océanographes.

• Les surfaces continentales

Des projets multidisciplinaires ciblés

■ Domaine du couplage entre hydrologie et météorologie.

Le groupe conjoint PATOM/PNRH a souligné la nécessité de se doter, en liaison avec les services opérationnels, d'un système d'observations dans la région Cévennes-Vivarais avec pour objectifs la collecte et l'archivage de données sur une période d'au moins 10 ans (2001-2010), l'évaluation sur de longues chroniques des performances des modèles méso-NH et TOPODYN, en vue de préparer à terme leur couplage.

■ Dans le cadre du projet CATCH (Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique) l'étude de la mousson africaine et de la réponse des systèmes hydrologiques aux variabilités intra et inter saisonnières du forçage pluviométrique, incluant une expérimentation intensive sur le terrain prévue au minimum sur 2 ans (2003-2005) impliquera différentes communautés travaillant autour des programmes PATOM, PNCA, PNEDC et PNRH.

■ Domaine de l'hydro-biogéochimie.

Les interactions entre les équipes qui développent des schémas de surface ISBA, SECHIBA et STOMATE doivent être renforcées. Les projets concernent :

- ▶ le développement de meilleurs modèles pronostiques eau-carbone-énergie, avec une description non triviale du rôle des principaux nutriments;
- ▶ des études ciblées sur les processus ou sur les écosystèmes les moins bien connus;
- ▶ le développement de méthodologies permettant la vérification des traités de type Kyoto.

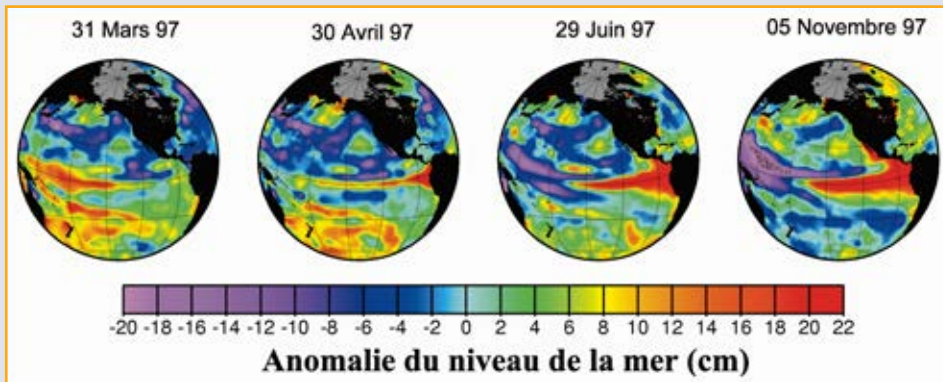
paléoclimatologie

Le
système
climatique

scénario

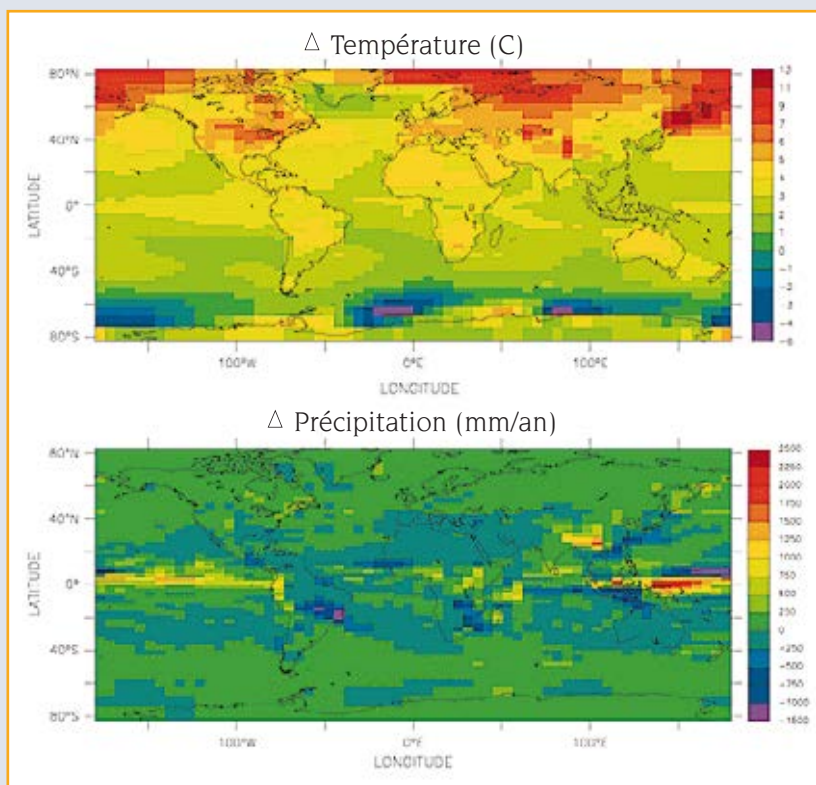
climatique

variabilité
climatique

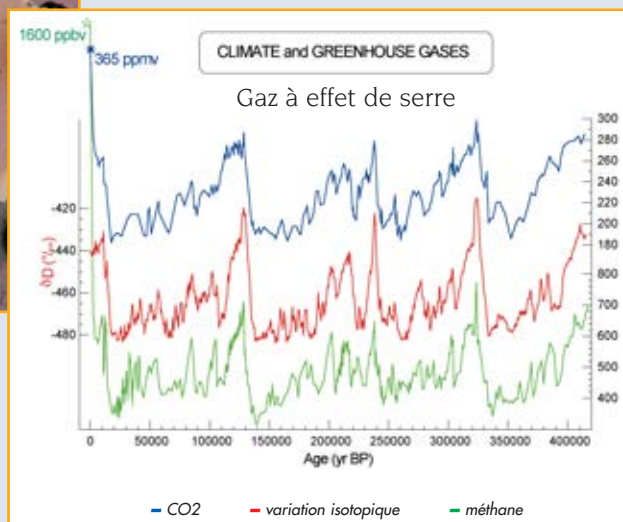
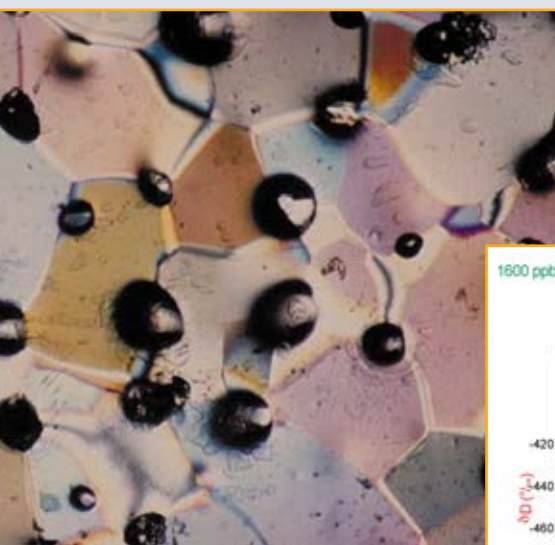


Le développement du dernier El Niño 1997-98: Anomalies du niveau de la mer, détectées par le satellite TOPEX/POSEIDON au déclenchement du phénomène (mars 97). La progression vers l'est de l'onde de Kelvin est identifiée par la progression de l'élévation du niveau de la mer (mars-avril). En novembre 1997, on obtient un schéma typique de la phase mature d'un événement. (CNES/CNRS/IRD/LEGOS)

Changement de température et précipitation entre 1850 et 2050, simulé à l'aide du modèle couplé Climat - Carbone de l'IPSL, prenant en compte, non seulement l'impact de l'augmentation du CO₂ sur le climat, mais également le rôle du climat sur la concentration en CO₂ (CNRS/LMD)



Programme GRIP : Greenland Ice Core Project, chargé d'analyser des carottes glacières en Antarctique Est. Cette photo en lumière polarisée, montrant des bulles d'air emprisonnées dans la glace, est un élément d'étude intéressant pour déterminer le rôle des gaz à effet de serre dans le système climatique global. (CNRS-LGGE)



La carotte de glace de Vostok (Antarctique) révèle les variations des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre (CO₂, CH₄) au cours des 400 000 dernières années, soit sur 4 cycles climatiques. La comparaison avec les variations de la température, estimée à partir de la composition isotopique de la glace (courbe du milieu) illustre la sensibilité du système climatique aux variations des gaz à effet de serre. Cette approche permet de mettre en perspective la perturbation anthropique en regard des forçages responsables des fluctuations naturelles du climat. (CNRS/LGGE et CEA-CNRS/LSCE)

Les enjeux de la recherche

L'étude du système climatique vise à intégrer les connaissances acquises sur l'océan, l'atmosphère, la cryosphère, la surface des continents et la biosphère, afin d'en étudier le comportement global. Celui-ci est marqué par des modes de variabilité forts et organisés (El Niño, oscillations décennales, ...) qui peuvent être prévisibles. Un objectif majeur est de comprendre comment le climat de notre planète réagit à un changement de forçage comme l'irradiation solaire, la teneur atmosphérique en aérosols ou en gaz à effet de serre, l'usage des sols (déforestation, érosion, irrigation) ou la distribution des continents et des chaînes de montagne pour des constantes de temps beaucoup plus larges. Le problème est particulièrement complexe, puisqu'il ne suffit pas de comprendre comment réagit chacune des composantes prises séparément, mais qu'il faut aussi tenir compte des interactions entre elles pour déterminer l'évolution de l'ensemble.

■ Ce système de haute complexité est donc un objet de choix pour les études académiques. De nouvelles interactions ont encore été découvertes récemment, ce qui rend le problème particulièrement attractif au plan intellectuel. Par exemple, des instabilités de la cryosphère, découvertes il y a moins de dix ans, ont ralenti la circulation océanique en climat glaciaire, diminué le transport de chaleur dans l'océan Atlantique Nord et entraîné une poussée du froid sur l'Europe. Un autre exemple concerne les cycles biogéochimiques dont l'étude ne peut désormais être menée indépendamment de celle des composantes physiques du système climatique.

■ Cependant, la compréhension du comportement de ce système présente un intérêt qui va bien au-delà du défi intellectuel qu'elle représente. Le bénéfice économique d'une prévision raisonnablement fiable des conditions climatiques serait énorme. A titre

d'exemples, EDF tirerait un bénéfice annuel d'un milliard de Francs d'une prévision correcte à 12 mois des pluies et des températures sur la France ; les compagnies d'assurance veulent savoir si la fréquence des événements extrêmes, comme les récentes tempêtes qui ont affecté la métropole, est susceptible d'augmenter au cours des prochaines décennies.

■ Le problème de la compréhension et de la prévision du climat est devenu encore plus aigu du fait de sa perturbation par les activités humaines. Les scientifiques ont été les premiers à attirer l'attention des décideurs sur le risque d'un changement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre et de particules produites par les combustions (feux de biomasse, activités industrielles). Les données les plus récentes ont permis de trouver l'empreinte d'un changement climatique induit par les activités humaines au cours de la fin du vingtième siècle. Cependant, il est encore difficile de faire quantitativement la part de l'évolution naturelle et de la perturbation anthropique dans les tendances observées récemment.

■ L'impact perceptible des activités humaines pose de nouveaux problèmes. Quel sera le climat à l'horizon d'un siècle ? De combien aura monté le niveau général des océans ? Quel sera son impact sur les côtes européennes ? Que deviendront les ressources en eau et quelles seront les conditions climatiques à l'échelle régionale dont dépend l'agriculture ? Quelle sera la variabilité des conditions météorologiques autour des nouvelles conditions moyennes et comment évoluera la fréquence des événements extrêmes ? La réponse à ces questions ne pourra se faire que sur une base statistique. Il est donc nécessaire d'évaluer la frontière entre prévisible et imprévisible, parce que celle-ci constitue un enjeu majeur, avec une portée politique importante pour les débats à venir.

Bilan des connaissances et place de la communauté française

Le bilan

Au cours de la dernière décennie, l'analyse de l'évolution du climat et de sa variabilité a fait des progrès considérables en raison de la mise en place de réseaux d'observations bien coordonnées et de leur interprétation à l'aide de modèles. Ceux-ci permettent en effet de mieux comprendre les mécanismes physiques, chimiques

et biologiques responsables de la variabilité naturelle ou susceptibles d'amplifier ou atténuer l'impact des perturbations anthropiques.

■ L'étude des paléoclimats a montré la sensibilité du système climatique à des variations minimes du bilan énergétique de la Terre (théorie astronomique) et de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre (déduite de la composition chimique des bulles d'air piégées

• Le système climatique

dans les glaces polaires). Le développement de la paléo-océanographie a conduit à la découverte, totalement inattendue, de l'instabilité de la circulation océanique à grande échelle et ses conséquences sur les transports de chaleur par l'océan. Enfin, l'étude des dépôts continentaux a permis de quantifier les fluctuations temporelles de la biosphère. Les modèles ont montré son rôle comme amplificateur de la variabilité climatique via le cycle de l'eau, les cycles biogéochimiques et les changements de l'albédo planétaire. L'analyse des climats anciens démontre que toutes les composantes du système climatique sont en interaction étroite et qu'aucune ne peut être négligée lorsqu'on veut prévoir l'évolution future de notre environnement.

■ L'analyse de longues séries de données météorologiques, complétée par des reconstitutions paléoclimatiques avec une résolution saisonnière ou annuelle, a fourni un ensemble d'observations démontrant que la seconde moitié du vingtième siècle avait été plus chaude que le reste du dernier millénaire. Les modifications climatiques constatées au cours des dernières décennies apparaissent de manière de plus en plus probables comme une manifestation de l'activité humaine sur le climat.

■ Les mesures effectuées à l'aide de systèmes d'observation dédiés à des problèmes spécifiques sont maintenant interprétées à l'aide de modèles de plus en plus performants. Cette approche a été la source de progrès significatifs. C'est ainsi que la mise en place de systèmes d'observation dans l'océan Pacifique a été la clé de la première démonstration de la possibilité de prévoir plusieurs mois à l'avance le développement du phénomène El Niño, dont les conséquences se font sentir dans toute la bande tropicale ouvrant ainsi la voie aux variations saisonnières.

■ La nécessité de bien connaître l'océan actuel en parallèle au développement de modèles couplés océan-atmosphère a conduit à la mise en œuvre du programme international WOCE qui a fourni la première vision intégrée de la dynamique océanique et de son rôle sur la variabilité du climat.

La place de la communauté française

■ Circulation océanique globale

Les équipes françaises ont participé activement au programme WOCE par un ensemble de campagnes océanographiques dans l'océan Atlantique sud et l'océan Indien, mais aussi par les observations spatiales, notamment grâce au satellite TOPEX-POSEIDON qui permet de suivre les variations du niveau de la mer avec une précision centimétrique.

■ Paléoclimatologie

La communauté française joue un rôle moteur au plan international pour l'étude des climats anciens. Elle a participé activement aux programmes GRIP et VOSTOK de forage glaciaire et elle a la responsabilité du programme de forage EPICA au Dôme C (Antarctique). Elle anime le programme international IMAGES de carottage dans les fonds marins pour obtenir des enregistrements à haute résolution des changements climatiques océaniques. Les possibilités uniques au plan mondial offertes par le navire océanographique Marion Dufresne constituent ici un atout essentiel. Toutes ces actions bénéficient du soutien de l'IFRTP, qui apporte aux

équipes scientifiques les moyens techniques nécessaires à la réalisation de leurs projets. L'intensification et la diversification des travaux de paléoclimatologie continentale ont permis de développer une base de données qui rassemble non seulement les données françaises, mais aussi tout un cortège de données obtenues par les équipes européennes en Europe et en Afrique. Ces données servent de termes de validation aux modèles paléoclimatiques dans le cadre du programme International PMIP, piloté par la France.

■ Grands cycles biogéochimiques

La communauté nationale a développé au cours des dix dernières années l'étude des cycles géochimiques des gaz et des aérosols. Elle joue un rôle majeur dans l'observation et la modélisation de la perturbation du cycle du carbone, ce qui l'a conduite à animer le programme international OCMIP d'inter-comparaison des modèles simulant la phase océanique du cycle du carbone. La contribution française à l'étude des grands cycles biogéochimiques s'inscrit dans le cadre GAIM-PIGB. Elle a porté essentiellement sur les interactions entre la biomasse marine et le carbone océanique, entre la biosphère terrestre et le carbone continental et, finalement, sur le couplage du cycle du carbone avec le climat. Les premières simulations datent de 1999. Elles ont montré que ce couplage est hautement non linéaire, ce qui constitue une révolution de pensée entre les communautés PMRC et PIGB. C'est pourquoi la communauté française est fortement impliquée dans le développement d'un projet transversal sur ce sujet rassemblant 13 groupes de 9 pays.

■ Scénarios pour le futur

La communauté nationale a souffert pendant longtemps d'un retard important dans le domaine de la modélisation climatique tridimensionnelle. Elle a pris l'option de développer des modèles de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan performants, en vue d'aboutir à un modèle couplé de bonne qualité. Celui-ci a été testé et effectuée des simulations sur des durées séculaires sans corrections de flux, artifice dont la validité est toujours douteuse lors de l'étude de changements climatiques. Cet objectif n'a été atteint que récemment, ce qui explique la faible participation des équipes françaises aux recherches sur la détection ou les scénarios de changement de climat en réponse aux perturbations anthropiques. En revanche, elle a contribué à des points clés, comme l'étude des régimes de temps, celle de l'effet radiatif des aérosols, la représentation de nuages interactifs dans les modèles, les rétroactions de la vapeur d'eau ou les mesures du bilan radiatif planétaire en s'appuyant sur l'important effort d'observations spatiales nationales (SCARAB, POLDER).

■ Variabilité inter annuelle. Rôle de El Niño

Les équipes françaises ont joué aussi un rôle important dans la compréhension du phénomène El Niño, à la fois par les mesures, par la mise en œuvre d'un modèle tridimensionnel de circulation générale de l'océan dont la qualité est reconnue au plan international et par un effort important dans le développement d'études de synthèse utilisant modèles et observations. La stratégie de modélisation a permis de développer non seulement une expertise de premier plan dans les régimes de circulation des basses latitudes mais également une approche intégrée de l'océan global, qui a contribué à des études originales sur la sensibilité du climat à la physique de l'océan.

Les axes prioritaires

L'échec récent de la Conférence de La Haye (novembre 2000) montre de façon éclatante, s'il en était besoin, que l'étude de l'ensemble du système climatique est une nécessité, si les décideurs veulent conduire une politique de développement durable et disposer des arguments pour convaincre leurs partenaires de l'accompagner. Un tel objectif nécessite un effort accru de recherche cognitive pour maîtriser les différentes facettes d'un problème dont la complexité est reconnue et sert parfois d'alibi à un refus de prendre des décisions. Dans ce contexte, la communauté française veut continuer à participer à l'effort de recherche international et elle engagera ses forces dans les domaines où elle dispose d'atouts majeurs, qu'ils concernent l'observation et l'analyse des données acquises ou la modélisation.

■ Le problème est global ce qui veut dire à la fois que les différentes composantes à étudier ont une dimension planétaire et que le système ne pourra être compris qu'en intégrant des recherches provenant de disciplines variées (physique, chimie, biologie) pour prendre en compte les principales rétroactions intervenant au sein du système climatique. Le rôle traditionnellement fédérateur de l'INSU, qui rassemble des communautés scientifiques disjointes autour de problèmes bien ciblés, constitue un atout majeur pour la communauté française.

Développement des observations

Les fluctuations inter annuelles et décennales mettent en jeu l'océan, l'atmosphère, la banquise et l'hydrologie continentale. Leur observation passe par la collecte de données *in situ* et de données satellitaires pour suivre l'évolution de la couverture nuageuse, du niveau de la mer, de la température superficielle des océans et de la teneur en phytoplancton des océans, de la glace de mer et de la composition chimique de l'atmosphère. De nouveaux capteurs devront être lancés pour assurer la continuité des observations ou pour permettre l'accès à de nouveaux paramètres essentiels : climatologie des nuages et des aérosols, teneur de l'atmosphère en gaz à effet de serre ou contribuant à son pouvoir oxydant.

■ Les fluctuations lentes du système climatique font intervenir l'océan profond et les grands glaciers continentaux. Cependant, la perturbation due aux activités humaines pourrait accélérer le temps de réponse de l'océan ou des glaces. Ceux-ci devront donc être surveillés par les réseaux d'observation qui se mettront en place

pour obtenir les longues séries temporelles nécessaires (mouillages de surface, profileurs dérivants,...) et par les observations satellitaires des calottes glaciaires, des banquises et de l'océan mondial. Ces réseaux pourront, à terme, être repris pour couvrir les besoins de l'océanographie opérationnelle.

■ La perturbation de la composition chimique de l'atmosphère (au-delà des aspects concernant la pollution qui sont traités dans le chapitre "Atmosphère") doit être suivie pour déterminer aussi précisément que possible, d'une part, les variations du pouvoir oxydant de l'atmosphère et, d'autre part, les sources et les puits de gaz à effet de serre à l'aide de modèles inverses. Il faudra ensuite étudier le rôle précis de chacun de ces gaz dans la perturbation du bilan radiatif. L'effort réalisé par l'INSU au cours des dernières années est un premier pas qui doit être amplifié dans un cadre multi-organismes pour assurer le développement et la pérennité d'un jeu de données indispensables en raison des traités internationaux sur les gaz à effet de serre. Les mesures faites dans ce cadre serviront aussi à acquérir une vision intégrée des grands cycles biogéochimiques.

■ Les données instrumentales ne permettent guère de remonter à plus de quelques décennies, au maximum un siècle et demi, pour les températures de l'air. Un tel jeu de données est d'une importance capitale. Lui seul permet d'appréhender les rétroactions rapides du système climatique qui sont aussi celles qui vont dimensionner, en premier lieu, l'amplitude de sa réponse et la localisation des impacts. La continuation de l'effort de veille climatique doit constituer un enjeu majeur de la communauté scientifique. Il passe en grande partie par l'outil satellitaire mais aussi par des moyens d'observations au sol. L'ensemble doit être conçu et analysé de manière globale et multidisciplinaire.

■ Cependant, ces données ne sont pas suffisantes pour décrire la variabilité complète du système climatique. Il faut donc faire appel aux données paléoclimatiques pour étendre les séries instrumentales et documenter l'évolution du climat, tant naturelle que perturbée. On ne connaît toujours pas avec précision l'état climatique de la Terre avant le début de l'ère industrielle, même si le réchauffement du vingtième siècle est indiscutable. La communauté française souhaite combler cette lacune en développant l'effort entrepris sur les glaces polaires, les glaciers alpins et tropicaux, les cernes d'arbres et les coraux, pour obtenir des séries climatiques couvrant les derniers siècles avec une résolution de l'ordre de la saison ou l'année.

• Le système climatique

■ L'analyse des climats anciens par l'étude des glaces polaires, des sédiments marins et des séries continentales contribue à aborder l'étude du système climatique dans sa globalité. Les programmes en cours ont pour objectif d'étudier les mécanismes des changements de climat aux diverses échelles de temps, des millions d'années aux décennies. Les échelles de temps géologiques sont destinées à documenter les relations entre le climat, la tectonique, l'érosion et le gaz carbonique. Les cycles glaciaires-interglaciaires illustrent la réponse au forçage de l'insolation et documentent les principales rétroactions agissant entre les différentes composantes du système climatique. Cette approche permet de mettre en perspective la perturbation anthropique en regard des forçages externes et internes responsables des fluctuations naturelles du climat. Enfin, ces études ont aussi pour but de comprendre comment des variations de grande amplitude se développent en quelques décennies, parce que les mécanismes responsables sont susceptibles d'entrer en jeu dans le contexte d'un climat perturbé par les activités humaines.

■ L'ensemble des données doit être archivé pour valoriser le travail des observateurs et permettre la pleine utilisation des observations pour valider les modèles climatiques. Si l'idée d'archives centralisées n'est plus d'actualité, la communauté nationale doit participer à l'effort international et les outils d'accès aux données acquises par les scientifiques français doivent être renforcés.

Développement de la modélisation

L'étude du système climatique dans sa dimension globale nécessite de prendre en compte les interactions entre ses différentes composantes. L'intégration de cette complexité représente un véritable enjeu pour la modélisation du climat dans les années à venir. La prévision du climat s'appuie sur des modèles globaux représentant le plus explicitement possible les processus intervenant dans le système climatique. Cette approche est complétée par des modèles plus simplifiés permettant d'explorer de plus longues échelles de temps et de mieux comprendre les mécanismes climatiques ayant régi l'histoire passée du climat.

■ Afin de mieux évaluer les risques climatiques résultant de l'action de l'homme, les modèles de climat doivent intégrer non seulement l'océan et l'atmosphère, mais aussi les glaces, les cycles biogéochimiques, la chimie de la troposphère et de la stratosphère, la biologie et la biochimie marine, ainsi que la végétation continentale en interaction avec les conditions climatiques instantanées. Ces développements sont indispensables en raison de la non-linéarité de la réponse du système climatique à des perturbations, même minimes, d'une de ses composantes. Ils impliqueront de nombreuses coopérations pluridisciplinaires pour réaliser l'intégration des connaissances acquises par des communautés très différentes. Les équipes françaises sont bien placées pour la réussir, en raison de leur expertise acquise dans chacun des domaines et au cours des premières expériences de couplage.

■ Une meilleure estimation des incertitudes sur le changement global passe également par une prise en compte du caractère aléatoire du

climat. L'expérience acquise à l'occasion de la prévision météorologique a montré que seul un grand nombre d'expériences permettait de mieux cerner l'évolution du système. Il faut donc simuler différentes évolutions possibles du climat et s'intéresser non seulement aux conditions moyennes de température et de pluies mais également à la variabilité du climat et aux phénomènes extrêmes qui ont une importance toute particulière sur l'homme. De plus, l'évaluation des modèles, passe par une confrontation systématique à des données représentatives de la variabilité du climat sur différentes échelles de temps, allant du dernier siècle aux extrêmes des derniers millénaires. L'ensemble de ces développements nécessitera cependant l'accès à une puissance de calcul considérablement accrue par rapport à celle qui est disponible actuellement.

■ Les impacts des changements climatiques seront étudiés à une échelle de plus en plus fine pour aboutir à des simulations réalistes, en profitant des progrès dans les recherches fondamentales et des développements méthodologiques pour passer de simulations à grande échelle à des études locales. L'approche qui permet de faire des "zooms" sur des régions présélectionnées représente une avancée significative et originale au plan international.

■ Au-delà des simulations d'états d'équilibre ou d'évolution transitoire, l'étude du système global se fonde sur l'observation de ses fluctuations. La synthèse entre modèles et données est primordiale. Les réseaux mondiaux d'observations météorologiques permettent de décrire de nombreux champs atmosphériques sur lesquels ont pu s'appuyer les développements des modèles atmosphériques et des paramètres associés. Il existe maintenant des satellites météorologiques qui effectuent une veille constante. Leur contribution est indispensable pour surveiller l'évolution des conditions climatiques et contrôler le comportement des simulations numériques. En ce qui concerne la chimie et l'océan, la connaissance et la quantification des mécanismes sont plus rudimentaires et ces disciplines ne bénéficient de couverture spatiale que depuis quelques années. L'existence d'un programme spatial fort est une chance pour les équipes françaises. Un effort important est nécessaire pour développer les méthodes d'assimilation et d'interprétation des observations afin de synthétiser les connaissances descriptives et mécaniques, avec trois objectifs majeurs : estimation de paramètres pour améliorer la représentation des processus dans les modèles, initialisation des systèmes couplés, et validation des simulations réalisées.

■ Ces axes prioritaires nécessitent une forte synergie entre les équipes travaillant sur les diverses composantes du système climatique pour que la communauté française occupe une place de premier rang au niveau européen et mondial. Ceci va de pair avec un accès à de gros moyens de calcul et un cortège d'ingénieurs, comme ceux dont bénéficient nos principaux concurrents (MPI, Hadley Center). Enfin, il faut souligner que dans les prochaines années, des modèles d'une nouvelle génération seront développés. Compte tenu des architectures de modélisation extrêmement lourdes, une réflexion doit être engagée au niveau national et européen pour élaborer une architecture commune permettant le meilleur usage des forces disponibles.

avions

navires

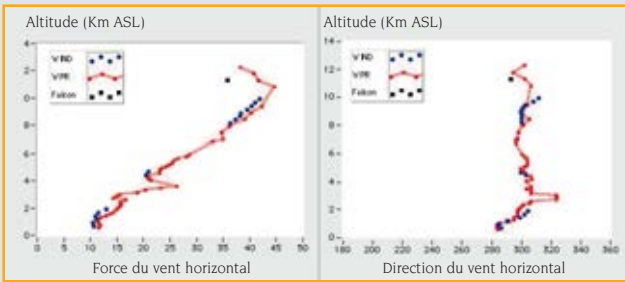
Grands
équipements
et développement
instrumental

mesures
spatiales

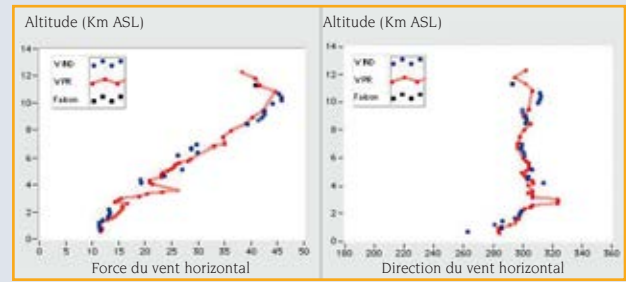
centres de
calcul

instrumentation

Inter comparaison des profils de vent (force et direction) restitués par WIND (moyennés sur 100s) et par le profileur radar du service de météorologie de Lindenberg (moyennés sur 25mn) le 22 octobre 1999. (LMD/CNRS)



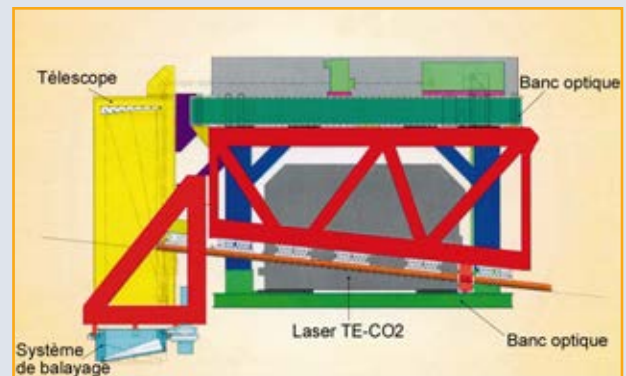
Trajet n°1
WIND à 13h35 TU (résolution temporelle 100 s)
Radar vent à 13h35 TU (résolution temporelle 25 mn)



Trajet n°2
WIND à 13h40 TU (résolution temporelle 100 s)
Radar vent à 13h35 TU (résolution temporelle 25 mn)

Schéma Lidar

Schéma de principe du lidar vent WIND
 Ce schéma présente l'implantation du laser émetteur TE-CO₂, du télescope, du système de balayage et des bancs optiques. (LMD/CNRS)



Vue d'artiste du satellite SMOS.

SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) est la deuxième mission des "Earth Explorer Opportunity Missions" de l'ESA . La mission SMOS consiste en un radiomètre interférométrique en bande L (1.4 GHz) installé sur une plateforme PROTEUS. L'objectif premier de cette mission est de délivrer des champs d'humidité des sols et de salinité des océans. Le lancement est prévu en 2005. (CESBIO/CNES/CNRS)

Le navire de station NEREIS II, de l'Observatoire océanologique de Banyuls, a une longueur de 14 mètres. Construit en Composite Verre Renforcé par le chantier GATTO de MARTIGUES, il peut être considéré comme le prototype des nouvelles unités affectées aux stations marines pour soutenir leur action de recherche et d'enseignement (CNRS/INSU/DT)



Les grands moyens nationaux : adéquation aux besoins, accès

Les grands moyens envisagés sont les grands centres de calcul scientifique et en particulier l'IDRIS (Institut du Développement et des Ressources en Informatique Scientifique), les satellites d'observation de la terre, les avions, et navires de recherche. Ils ont en commun de correspondre au besoin d'une large communauté, et de nécessiter un effort financier considérable pour leur fonctionnement et leur renouvellement, éventuellement partagé entre plusieurs organismes.

Accès aux grands centres de calcul (IDRIS en particulier)

En modélisation du climat, de l'atmosphère et de l'océan, les problèmes étudiés et les outils utilisés évoluent très rapidement, et deux aspects peuvent être soulignés :

- ▶ développement de modèles globaux couplés océan-atmosphère-cryosphère-biosphère pour l'étude de la variabilité climatique naturelle aux échelles décennales à millénaires, ainsi que celle des scénarios d'impact de l'activité humaine (incluant le couplage physique-chimie atmosphérique) ;

- ▶ réalisation de simulations d'ensembles climatiques pour l'étude de la variabilité à relativement court terme du climat en raison de la nature chaotique du système climatique. Ces approches statistiques vont se systématiser dans les prochaines années.

■ Une tendance lourde est l'augmentation de la résolution des modèles atmosphériques et océaniques et impose le recours au calcul parallèle. Les estimations faites par la communauté américaine chiffrent à 5 Tflops soutenus les besoins des modèles à haute résolution vers 2005. Le plan de développement du CEPMMT (Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme) prévoit de porter le modèle global de ce centre à 15x15km²/90 niveaux en 2008, c'est-à-dire celle utilisée aujourd'hui en recherche à mésoéchelle sur une petite région. Dans ce plan, la puissance soutenue du CEPMMT atteindrait 20 Tflops. La grappe NEC-SX5 qui vient d'être installée à l'IDRIS correspond à une puissance soutenue d'environ 200 Gflops. Le retard de la communauté française n'a donc été que transitoirement comblé avec l'amélioration récente des capacités de l'IDRIS. L'effort de remplacement

de la machine parallèle T3E de l'IDRIS est crucial pour l'avenir de notre communauté.

■ Par ailleurs, les travaux de modélisation passent le plus souvent par une collaboration entre plusieurs organismes (Météo France, CEA, CINES, CERFACS, CNES, Universités, CNRS), impliquant le transfert des codes numériques sur des machines différentes. Il importe d'améliorer la concertation entre le CNRS et ces organismes, et surtout d'assurer de bonnes performances au réseau RENATER2 et aux plaques régionales ouvrant l'accès aux machines de nos partenaires. Il faut cependant se poser la question de se doter d'une machine parallèle nationale de grande puissance répondant aux besoins de la recherche sur le climat.

■ Enfin, les codes numériques développés sont de grande taille et ont une longue durée de vie, ils correspondent souvent à plusieurs dizaines d'années-chercheur d'investissement. En outre, ils font de plus en plus appel à des couches de haute technologie de programmation. Le développement et l'optimisation de tels codes est un métier. Le développement du potentiel des équipes de modélisation en ingénieurs informaticiens de haut niveau est donc essentiel.

Accès aux mesures spatiales

L'utilisation des mesures spatiales s'est fortement accrue depuis une dizaine d'années pour la recherche sur l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales. Les mesures historiquement les plus utilisées sont celles des satellites météorologiques opérationnels. La maîtrise de techniques en optique et hyperfréquence dans les laboratoires et au CNES a conduit à la réalisation d'un certain nombre de capteurs spatiaux (ex : radar altimètre). Les instruments existant dans les laboratoires (lidars, radars, spectromètres) ont préparé l'utilisation des nouvelles mesures spatiales (constituants atmosphériques, précipitations...), avec le soutien du CNES et des programmes nationaux. Cette évolution se traduit par une forte participation des scientifiques français à la préparation des futures missions spatiales dans le cadre de l'Agence Spatiale Européenne ou en coopération bilatérale, en particulier ENVISAT et JASON. Cependant, la multiplication actuelle des appels d'offre nécessite une certaine

• Grands équipements et développement instrumental

organisation des réponses. La prospective scientifique doit servir de base pour définir les axes principaux dans lesquels des propositions sont souhaitées, et pour éventuellement susciter des propositions coordonnées de nouveaux instruments, ou de démarches innovantes sur la qualification et l'utilisation des données.

■ Notons le besoin de nouveaux capteurs ou de missions combinant plusieurs capteurs pour :

- ▶ la mesure de profils verticaux des constituants atmosphériques concernant le cycle de l'eau, la chimie atmosphérique et les aérosols depuis la surface jusqu'à la stratosphère;
- ▶ la dynamique et les processus impliqués dans les systèmes convectifs tropicaux et des latitudes tempérées;
- ▶ le suivi de la surface océanique (altimétrie, salinité), des surfaces continentales (hydrologie, biosphère) et des zones côtières.

■ Le cadre européen ou bilatéral est le plus favorable pour engager des projets complexes et chers, mais les microsattellites devraient permettre de faire la démonstration de concepts nouveaux, et susciter des développements d'instruments petits, facilement intégrables ensuite sur d'autres plates-formes. L'étalonnage-validation des futurs instruments doit être envisagé dès la préparation de la mission, afin de disposer d'instruments de mesures sol ou aéroportées adéquats. L'ensemble des activités de définition, préparation et exploitation d'une mission spatiale doit associer les utilisateurs finaux ("thématiciens" qui manipulent des données inversées et validées) aux "instrumentalistes" (qui participent au développement d'instruments spatiaux ou de simulateurs, à la qualification des mesures spatiales et développent des outils d'inversion). Les travaux préparant l'assimilation des observations spatiales dans les modèles devraient être amplifiés et généralisés à tous les domaines.

■ Par ailleurs, l'arrivée massive de données crée un problème de gestion, avec la réalisation des segments-sol des missions spatiales sous responsabilité française. Il doit être traité dans le cadre de bases de données multi-capteurs, qui sont nécessaires pour l'interprétation et l'exploitation des mesures sur de longues périodes temporelles. La réalisation de la base de données ETHER (chimie atmosphérique) en est un exemple.

■ Enfin, une fois l'intérêt scientifique d'un capteur acquis, se pose le problème de continuité de ces mesures : il est nécessaire d'élaborer une stratégie européenne et internationale pour l'observation de la terre à long terme.

Accès aux avions de recherche

La mesure aéroportée est essentielle pour la recherche atmosphérique, car elle permet d'explorer le milieu atmosphérique entre le sol et la basse stratosphère à des échelles de temps et d'espace complémentaires des observations effectuées depuis le sol ou depuis un satellite. L'utilisation d'avions au cours de campagnes de mesures permet par exemple l'établissement des paramétrisations des processus d'échelle inférieure à la maille des modèles mésoéchelle ou globaux, la préparation et la validation de capteurs satellitaires.

■ Les avions de recherche français sont actuellement dans une phase très avancée de renouvellement. L'objectif est de disposer, dans les prochaines années, de deux avions : un turbopropulseur (charge utile

2 tonnes, autonomie 7 heures au moins) pour les mesures de la basse et moyenne troposphère, et un avion de type jet permettant l'étude de la haute troposphère, possédant un rayon d'action (> 4000 km) suffisant pour traverser les grandes régions océaniques. Ce dernier est indispensable pour permettre les études des nuages et du rayonnement, ainsi que pour transporter des démonstrateurs spatiaux associés aux prochaines missions spatiales. L'acquisition du turbopropulseur est décidée, et le second devrait être le Mystère 20 de l'IGN/INSU après nouvelle motorisation et mise aux normes.

■ Ce renouvellement de la flotte des avions français intervient dans le contexte d'une collaboration européenne, formalisée par un programme européen, en partenariat avec la Grande-Bretagne et l'Allemagne. Mais on peut noter que la situation européenne est loin de celle des Etats-Unis, où plusieurs organismes et universités possèdent des avions qui participent aux grandes campagnes internationales. Notons par ailleurs que plusieurs pays sont également dans une phase de renouvellement de leurs avions de recherche (C-130 en Grande-Bretagne, avion HIAPER aux USA, avion stratosphérique Geophysica géré au niveau Européen).

■ L'accès aux avions est géré par le comité inter-organismes des avions de recherche. Dans l'avenir, il devra prendre en compte le développement des collaborations internationales. La procédure de sélection nationale devrait s'intégrer ou s'appuyer plus largement sur les programmes européens en cours ou à venir.

Accès aux navires de la flotte hauturière

La flotte hauturière de recherche océanographique se compose des 4 navires gérés par l'IFREMER, du Marion-Dufresne géré par l'IFRTP, et de deux navires de l'IRD. Des navires du SHOM sont utilisés lors de campagnes de mesures en coopération. L'utilisation simultanée de moyens de mesures de plus en plus nombreux et pluridisciplinaires tend à accroître la taille des équipes embarquées. Avec l'essor actuel des études sur le couplage entre physique et biogéochimie, le couplage océan-atmosphère à moyenne et grande échelle (programme CLIVAR), on peut prévoir que la demande de campagnes en mer ne fléchira pas dans les prochaines années.

■ Seul le Marion-Dufresne croise régulièrement dans les eaux antarctiques, très importantes d'un point de vue climat et biogéochimie (soutien aux services d'observation ROSAME et OISO, en particulier), et où les équipes françaises ont acquis une compétence reconnue. Même si les capacités de ce navire sont utiles pour d'autres zones climatiques, il faut maintenir une disponibilité suffisante dans l'Océan Indien Sud.

■ La flotte océanographique française est comparable à celles de nos principaux voisins. Un système d'échange de temps-bateau et de grands équipements entre la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni permet une optimisation de l'utilisation des divers navires. Le renouvellement des navires est une opération très lourde financièrement. Au-delà de la construction prévue d'un navire (avec spécificité porte-engine), la communauté scientifique devrait être consultée, pour tenir compte de l'évolution des besoins (pluridisciplinarité, nouveaux instruments, utilisation au large et en côtier,...) dans les spécifications d'un futur navire.

■ L'accès aux navires se fait au travers de procédures de sélection passant par une commission thématique de l'IFREMER, puis par des décisions des organismes, qui prennent en compte également des utilisations

opérationnelles ou affrètements. La mise en place logistique de l'océanographie opérationnelle dans les prochaines années réclamera le déploiement de systèmes de mesures sur de larges zones océaniques. Il faudra veiller à ce que l'engagement des organismes ne pénalise pas les demandes de campagnes scientifiques. C'est pourquoi la coordination des différents organismes pour la sélection des campagnes doit s'accompagner d'une clarification sur les décisions finales. Une priorité forte doit être donnée aux propositions soutenues par les programmes de recherche nationaux. Certaines demandes relatives à des services d'observation ou à des programmes déjà expertisés devraient pouvoir se dispenser d'examen complet répété. Des règles garantissant un accès minimum et dans de bonnes conditions (date, nombre d'embarquants) doivent être établies pour l'utilisation de la flotte par la communauté scientifique.

Accès aux navires côtiers

Les navires utilisés en océanographie côtière (domaine allant du littoral ou estuaire aux limites du plateau continental) dépendent de l'INSU et de l'IFREMER. Il est parfois nécessaire d'utiliser un navire hauturier, en raison du nombre d'embarquants, de l'utilisation d'équipement lourd, ou des risques météorologiques encourus.

■ La structuration des recherches autour des programmes nationaux ces dernières années a conduit à une forte évolution des campagnes. Les travaux, pluridisciplinaires, concernent entre autres les cycles biogéochimiques du carbone ou de l'azote, la dynamique des espèces exploitées et l'évolution des écosystèmes côtiers, et impliquent la réalisation de visites régulières sur certains sites.

■ La sélection de demandes de temps navire INSU et IFREMER est effectuée par les deux Comités Inter-Régionaux (CIR). Cette coordination doit être renforcée, pour optimiser l'utilisation des navires, que ce soit pour les campagnes scientifiques, les essais techniques ou l'enseignement. Les opérations soutenues par des programmes nationaux doivent être prioritaires pour l'attribution des moyens à la mer, mais il faut assurer une certaine souplesse de la programmation pour des ajustements en cours d'année. Cette coordination entre les deux organismes pourrait être étendue au parc d'équipements embarquables.

■ Au-delà des navires polyvalents et performants comme Le "Côtes-de-la-Manche" ou le "Téthys", apparaissent deux besoins nouveaux :

► un second navire sur la façade atlantique pour les observations régulières dans les estuaires, qui nécessitent un faible tirant d'eau et la capacité d'opérer dans des eaux chargées : le navire actuel, partagé entre baie de Seine et Gironde, perd beaucoup de temps en transits ;

► un navire polyvalent de 30 à 40m, intermédiaire entre flottes côtière et hauturière, pour documenter le plateau continental même par mauvais temps, avec la possibilité d'embarquer des équipes plus larges.

■ Par ailleurs, l'INSU a équipé le Téthys d'un système autonome comprenant des mesures de profil vertical de courant (ADCP), et des paramètres météorologiques. Le même dispositif de mesures devrait être installé sur au moins un navire de la façade Manche Atlantique. Le développement de tels moyens de mesure fournira des séries de données à moyenne échelle utiles pour l'étude du fonctionnement et de la modélisation de l'océan côtier.

Recommandations générales sur les grands moyens

Les grands moyens nationaux utilisés pour la recherche sont gérés, on l'a vu, par des organismes différents. Ils ont permis aux équipes françaises des percées importantes, et leur pérennité est essentielle. De façon générale, ces outils doivent rester principalement au service de la recherche, avec une forte priorité pour les besoins associés à des programmes nationaux ou internationaux reconnus et soutenus par la communauté scientifique.

■ Le renouvellement de ces moyens doit être effectué en lien étroit avec les laboratoires de recherche, et une coordination inter-organismes est nécessaire pour ajuster la programmation de ces moyens aux besoins des équipes scientifiques françaises. Toutefois, l'ouverture progressive aux équipes européennes, et parallèlement, de l'utilisation de moyens d'autres pays par les équipes françaises conduit à une nécessaire adaptation des procédures de sélection. Ceci devrait conduire à une plus grande coopération entre les organismes européens (ou autres, tel la NSF des Etats-unis), qui facilitera la réalisation d'opérations expérimentales de grande envergure.

• Grands équipements et développement instrumental

Priorités pour le développement instrumental

On s'intéressera dans cette partie aux instruments développés par des laboratoires, ou en partenariat entre laboratoires et la Division Technique (DT) de l'INSU ou un service technique d'organisme (Météo France, IFREMER, CNES, ...), voire dans le cadre d'une coopération internationale. Sont inclus également les instruments installés à demeure dans le cadre d'un service d'observation, et gérés par des équipes scientifiques avec le soutien de l'INSU, ainsi que le parc instrumental de la Division Technique.

Les instruments de physique et biogéochimie marines

Durant la dernière décennie, des développements ont été réalisés à la fois sur les supports destinés à recevoir les capteurs (flotteurs lagrangiens ou eulériens, profileurs ancrés, véhicules télécommandés, supports reposant au fond (Lander)), sur les capteurs eux-mêmes (mesures physiques, chimiques, biologiques) et sur des nouveaux types de prélèvements (par exemple, préleveur hyperbar). Les outils de mesure *in situ* et autonomes développés concernent l'océanographie physique (y compris la préparation de l'océanographie opérationnelle), la surveillance et l'observation à long terme dans le domaine côtier ou océanique. Il faut poursuivre cet effort, à la fois sur les supports (en particulier lander) et sur les capteurs pour lesquels la priorité est la miniaturisation et l'automatisation, notamment en biogéochimie. Il faut souligner aussi le manque de moyens de mesure adaptés à l'étude des interactions océan-glace-atmosphère. Par ailleurs, l'utilisation de techniques de base, comme la biologie moléculaire, devrait faire l'objet d'un effort national de développement.

■ Différentes combinaisons de partenariat entre DT/INSU, laboratoires, IFREMER et industriels ont conduit soit à des produits commerciaux, soit à des prototypes. Les efforts de la DT/INSU et de l'IFREMER devraient être coordonnés pour mener à bien les projets et mettre les instruments à la disposition des équipes (parc national de l'INSU, pour lequel la politique volontariste de jeunesse doit être poursuivie).

■ Le développement et l'automatisation des stations de mesure fixes est une priorité. Elles fourniront sur le long terme des données indispensables à un suivi de l'environnement marin, et permettront l'analyse de sa réponse aux perturbations d'origine naturelle ou anthropique. Dans le cas du réseau SOMLIT qui s'intéresse à des phénomènes de durée au moins décennale, le problème est d'extraire une ou des tendances communes à partir de situations ayant des caractéristiques propres et une grande variabilité temporelle et spatiale. Pour cela, l'évolution vers une mesure automatisée d'un certain nombre de paramètres physiques chimiques et biologiques est indispensable : certains paramètres (salinité, température, oxygène, turbidité, fluorescence, nitrate) sont désormais accessibles en continu de façon fiable sur plusieurs mois, grâce au système de bouée MAREL de l'IFREMER. Pour suivre les paramètres essentiels liés au cycle du carbone et la structure verticale fine dans certaines zones, il faut poursuivre le développement instrumental des sites principaux.

■ Le service d'observation DYFAMED doit de même évoluer vers l'automatisation partielle des mesures. D'autres voies que celles actuellement utilisées pourraient être explorées par un effort conjoint des laboratoires, de la DT/INSU et de l'IFREMER, en relation avec des partenaires industriels.

■ De manière similaire, l'automatisation des mesures de physique et biogéochimie sur les navires est indispensable pour développer les études du couplage physique-biogéochimie, compte tenu des contraintes en nombre d'embarquants sur les navires. De tels dispositifs pourraient bénéficier en particulier au service d'observation OISO. Pour ces instruments, qui devraient progressivement équiper en standard les navires océanographiques hauturiers et côtiers, les procédures de mise en œuvre et étalonnage, le contrôle de qualité des données et le traitement des données devraient être établis de façon à permettre l'utilisation des données par le plus grand nombre.

Instrumentation de physique et chimie de l'atmosphère

■ Instrumentation aéroportée

Le renouvellement de la flotte des avions devrait être mis à profit pour intégrer dans notre parc d'instruments les dernières avancées technologiques. Il faut en particulier évoluer vers des instruments plus facilement adaptables d'un avion à l'autre.

■ Les instruments de base des avions doivent satisfaire à des critères d'assurance-qualité stricts (fourniture des spécifications aux utilisateurs, étalonnage régulier). Certains doivent être renouvelés; notons le besoin de mesures des faibles valeurs d'humidité, ainsi que de la température en milieu nuageux. Concernant la mesure des hydrométéores, des capteurs validés lors d'expériences récentes (néphélomètre, fast-FSSP) doivent être adaptés. La mesure des aérosols dépend des possibilités de prélèvement en conditions isocinétiques; il est nécessaire d'améliorer la veine existante sur l'ARAT, la doter d'un asservissement du système de prélèvement, en prenant en compte les résultats récents sur les sondes isocinétiques. Pour les mesures de rayonnement, le système de radiomètres CLIMAT est issu de développements techniques des équipes françaises, et en chimie atmosphérique une forte priorité est accordée à la mesure aéroportée de certains traceurs des émissions de composés chimiques (O₃, CO).

■ Les instruments spécifiques incluent les instruments de télédétection (lidars, radars, radiomètres) et certains instruments de mesures de concentration d'espèces chimiques, trop encombrants pour être installés à demeure. Bien qu'ils soient mis en œuvre sous la responsabilité d'équipes scientifiques, ils doivent disposer d'une chaîne de traitement appropriée permettant à tous les utilisateurs d'obtenir des mesures validées. L'adaptation au Mystère 20 imposera une miniaturisation qui sera également bénéfique pour conserver une autonomie maximale à l'avion à turbopropulseurs. Le problème spécifique à certains instru-

ments de télédétection est le positionnement extérieur de l'antenne, nécessitant une qualification en vol. En ce qui concerne les instruments de chimie, il existe maintenant deux instruments quasi-opérationnels pour la mesure des hydrocarbures. Pour la mesure d'autres espèces (les radicaux hydroxyles par exemple), la panoplie des espèces gazeuses mesurables devrait s'étendre grâce à l'utilisation de la spectrométrie de masse à ionisation chimique ou photochimique. Aux espèces chimiques s'ajoute la collecte des aérosols, pour la documentation de leur distribution verticale. Enfin, la préparation de missions spatiales requiert de plus en plus la réalisation de simulateurs aéroportés, qui peuvent être ensuite utilisés pour des campagnes de mesures scientifiques. Ces instruments doivent donc être développés en suivant les recommandations précédentes (dimension et poids faibles, portabilité).

■ En ce qui concerne les radars aéroportés, une solution semble avoir été trouvée pour le radar franco-américain ASTRAIA (actuellement embarqué sur l'Electra du National Center for Atmospheric Research, NCAR et qui doit être désarmé), par l'embarquement sur un avion quasiment identique du Naval Research Laboratory.

■ Instrumentation sol

Les équipes françaises ont maintenant un ensemble d'instruments de mesures physiques de terrain de qualité, incluant des radars, des lidars, ainsi que des capteurs de physique et chimie. Ces instruments sont pris en charge par les laboratoires, mais l'intérêt de la communauté pour leur utilisation implique des contraintes fortes sur ces équipes. Il en est de même pour les stations de mesures permanentes (services d'observation, station du Puy de Dôme, sites instrumentaux des Observatoires des Sciences de l'Univers comme l'OMP et l'IPSL). Il faut renforcer le personnel technique responsable de ces instruments. Concernant l'instrumentation en laboratoire, l'étude de la spéciation de l'aérosol organique, important pour les relations aérosols/climat, impliquera des besoins accrus.

■ Le développement en spectrométrie de masse à ionisation et photo-ionisation (mesure de très nombreuses espèces gazeuses avec des pas de prélèvement très courts y compris pour les radicaux), déjà mentionnée, a été récemment engagé et cette technique semble très prometteuse. Ses applications en chimie atmosphérique sont nombreuses : études en laboratoire de mécanismes réactionnels, participation à des campagnes sols intensives, mesure de flux au-dessus de la surface, mesures aéroportées. Dans ce domaine, la France est actuellement largement en retrait par rapport à l'Allemagne et aux USA et il faut veiller à sa montée en puissance dans les prochaines années. Du fait de la part importante de l'aspect développement (mise au point de la partie ionisation pour la mesure de tel ou tel composé, transformation en

version aéroportée) cela suppose, outre l'implication financière, un soutien important en personnel très qualifié.

L'instrumentation pour la surface terrestre et les glaces polaires

Les priorités de recherche sur les surfaces continentales concernent les approches à l'échelle intermédiaire (le paysage), de manière à aboutir à une représentation continue des interactions atmosphère-biosphère-hydrosphère.

■ Les échanges entre le sol et l'atmosphère.

L'utilisation hydrologique des radars météorologiques doit être développée par l'analyse plus complète du signal (tir à tir, référence au relief, diversité de polarisation) et l'utilisation des réseaux de radars pour suivre les précipitations à l'échelle régionale (étude du fonctionnement des bassins versants). Pour ce qui concerne l'évapotranspiration, le développement de méthodes de type lidar ou scintillométrie doit être stimulé par leur intégration dans des expériences où sont déployées différentes techniques de mesure locale. Une démarche similaire doit être menée en ce qui concerne les autres flux biogéniques (carbone, hydrocarbures,...).

■ L'humidité du sol, de la végétation et du bâti

La priorité est le développement de méthodes fiables de suivi temporel de la teneur en eau et des chemins empruntés par l'eau. Il faut en particulier étendre l'utilisation des méthodes diélectriques (TDR, GPR, sondes capacitives...), et améliorer la précision, la portabilité et l'intégration de ces capteurs dans des systèmes de surveillance.

■ Les écoulements en rivière

On mesure actuellement le débit à l'exutoire de certains bassins, au moyen de courbe de tarage et de mesures directes, souvent risquées en crue. Des approches "sans contact" devraient être développées pour permettre des mesures automatiques et continues en tous temps (techniques CODAR de détection Doppler hyperfréquence ou "Particle Image Velocimetry" appliquée à de l'imagerie vidéo).

■ Les glaces polaires

La priorité concerne le développement d'un nouvel engin de forage de la glace, aisément transportable par petit porteur (Twin Otter) sur les calottes polaires et pouvant atteindre si possible en une saison (2 à 3 mois) une profondeur de 1 000 mètres. Un des enjeux scientifiques majeurs est l'obtention, en différents sites critiques, d'enregistrements à haute résolution

• Grands équipements et développement instrumental

du climat et de certains paramètres de l'environnement atmosphérique sur les derniers 10 à 15 000 ans (comparaison avec les enregistrements marins et continentaux). Un effort conjoint entre l'IFRTP, l'INSU et ses partenaires européens serait un atout majeur pour mener à bien ce projet.

Recommandations sur le développement instrumental

Dans tous les domaines, il faut améliorer notre capacité à planifier les développements instrumentaux. De plus, la mise au point puis l'exploitation des instruments réalisés doit être suivie de façon rigoureuse, pour éviter certains problèmes rencontrés dans les années passées. Par exemple, les retards pris dans la mise au point d'instruments par des équipes trop petites, s'étalant sur des années. Cela entraîne un risque de voir l'instrument équivalent développé par des industriels ce qui affaiblit l'intérêt des efforts de développement. Un autre écueil est le manque d'intérêt ou de prise en charge du traitement des données et de l'exploitation scientifique (instrument développé pour lui-même). Enfin, il peut y avoir difficulté de gestion de l'instrument pour l'ensemble de la communauté par l'équipe qui l'a développé, victime de son succès...

■ Par ailleurs, il apparaît essentiel d'éviter les duplications d'efforts dans les divers organismes. Une coordination en amont permettrait d'optimiser l'utilisation des compétences existantes dans les laboratoires et les services techniques des principaux organismes de recherche. De même, si la coopération internationale est un atout majeur pour permettre des projets instrumentaux ambitieux, il importe de garder un contrôle suffisant sur les projets pour éviter des échecs ou des retards.

■ Pour ces raisons, le fonctionnement actuel de la Commission Spécialisée Océan-Atmosphère (CSOA) dans son activité de suivi de l'instrumentation devrait évoluer en amplifiant son rôle de structure de coordination inter-organismes, sur les grands moyens pour la recherche, et de stratégie en matière de développement instrumental.

■ Pour garantir la réussite des développements instrumentaux, une structure de projet doit être adoptée dès que l'instrument envisagé ne peut être construit dans un délai court (un an) par l'équipe. On peut envisager la démarche suivante :

- ▶ après acceptation préliminaire, étude de faisabilité technique;
- ▶ évaluation de l'intérêt scientifique, implication d'utilisateurs potentiels des données;
- ▶ démarrage du projet, avec suivi régulier par un groupe de suivi, prise en compte du traitement des données, et si possible valorisation des techniques mises en œuvre (brevet, licence).

■ Les groupes de la CSOA devraient être responsables de la prospective instrumentale, assurer le suivi général des projets, sans oublier la jouvence des matériels existants (en particulier services d'observation). Tout instrument nouveau intéressant la communauté a vocation à être utilisé par d'autres équipes que celle qui l'a développé. C'est pourquoi on ne peut pas considérer la réalisation technique sans préparer en parallèle la gestion ultérieure de l'instrument, sa maintenance et les logiciels de traitement de données robustes permettant aux autres équipes d'utiliser facilement les données (c'est-à-dire sans être spécialiste de la physique de la mesure). De même, un inventaire de l'existant, remis à jour régulièrement, permettrait d'encourager la mise à disposition entre équipes, plutôt que l'achat de multiples exemplaires. Un soutien

devrait être donné pour la mise au point de logiciels de traitement de données documentés associés à ces instruments.

■ Cette démarche vaut a fortiori pour le parc d'instruments dits nationaux, qu'ils soient pris en charge par un laboratoire ou par la division technique. Une conséquence majeure est que le personnel technique attaché à ces instruments doit augmenter pour prendre en compte les tâches nouvelles. Cela doit passer par le regroupement de techniciens et ingénieurs dans des centres (observatoires, fédérations, division technique) chargés de développer, maintenir l'instrumentation nationale, et distribuer les données traitées.

■ Des sections précédentes, certaines priorités générales concernant les besoins en instrumentation peuvent être dégagées :

- ▶ automatisation et miniaturisation des instruments, pour embarquement sur des plates-formes (avions, ballons, navires, bouées) ;
- ▶ développement de techniques de base utiles pour de nombreuses applications en chimie atmosphérique ou biogéochimie (par ex. la spectrométrie de masse à ionisation pour la mesure aéroportée de chimie atmosphérique ; spectrométrie de masse et biologie moléculaire en biogéochimie marine).

Les projets instrumentaux : rôle de la division technique de l'INSU

Elle doit continuer d'intervenir en soutien des équipes dont le potentiel technique ne permet pas la réalisation des projets dans des conditions satisfaisantes. Les équipes techniques de la DT n'étant pas, en général, à proximité des unités de recherche avec lesquelles elles travaillent, il est indispensable de mettre en place une structure rigoureuse de groupe de projet selon des règles proches de celles du spatial : cahier de charges bien défini, revues d'avancement fréquentes et bonne circulation de l'information par tous les moyens modernes de diffusion. La DT, en fonction des situations, soit prend en charge le projet complet et dans ce cas, les relations doivent s'établir entre l'équipe DT et le responsable scientifique, soit participe au projet en prenant une ou plusieurs des tâches et dans ce cas les relations doivent être parfaitement définies dès le début de l'opération. Elle peut également intervenir sur des projets plus modestes, ne nécessitant pas la procédure lourde de suivi ci-dessus. Une fois l'instrument réalisé, la DT n'assure ni la maintenance ni le suivi, sauf s'il entre dans le parc national.

■ L'évolution de l'instrumentation dans nos domaines doit s'accompagner d'une évolution des métiers. Par exemple, il faut aller vers plus de simulations en phase de définition/étude de faisabilité (acquisition de logiciels souvent coûteux et inutiles à disséminer dans tous les laboratoires) et vers plus de compétences dans les intégrations et recettes en laissant la réalisation à la sous-traitance.

séries

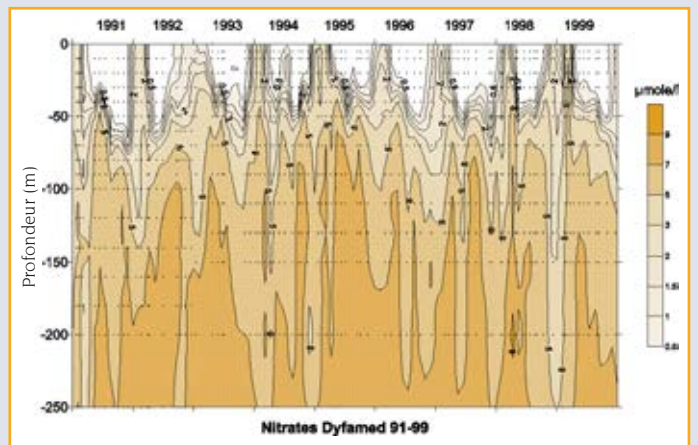
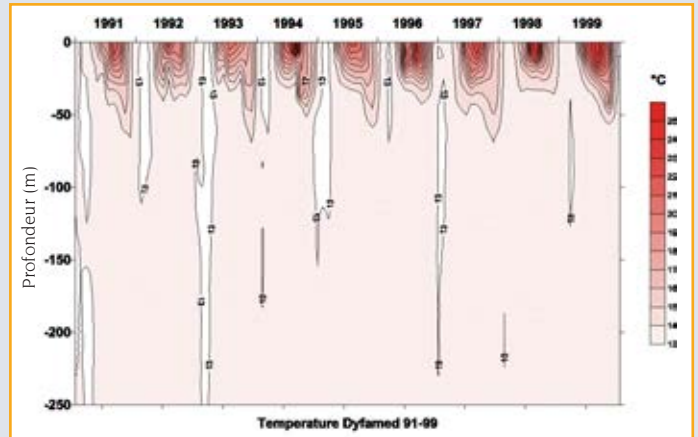
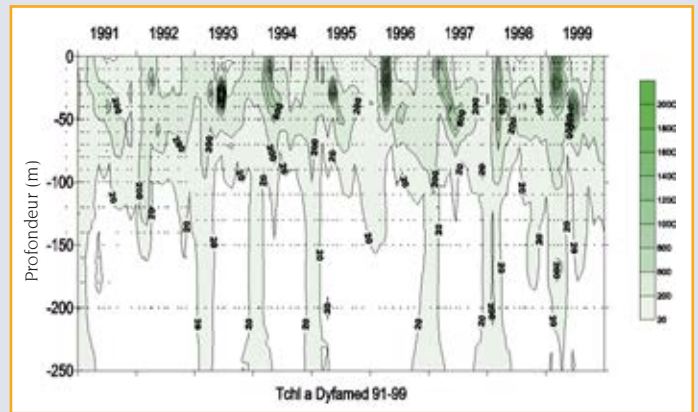
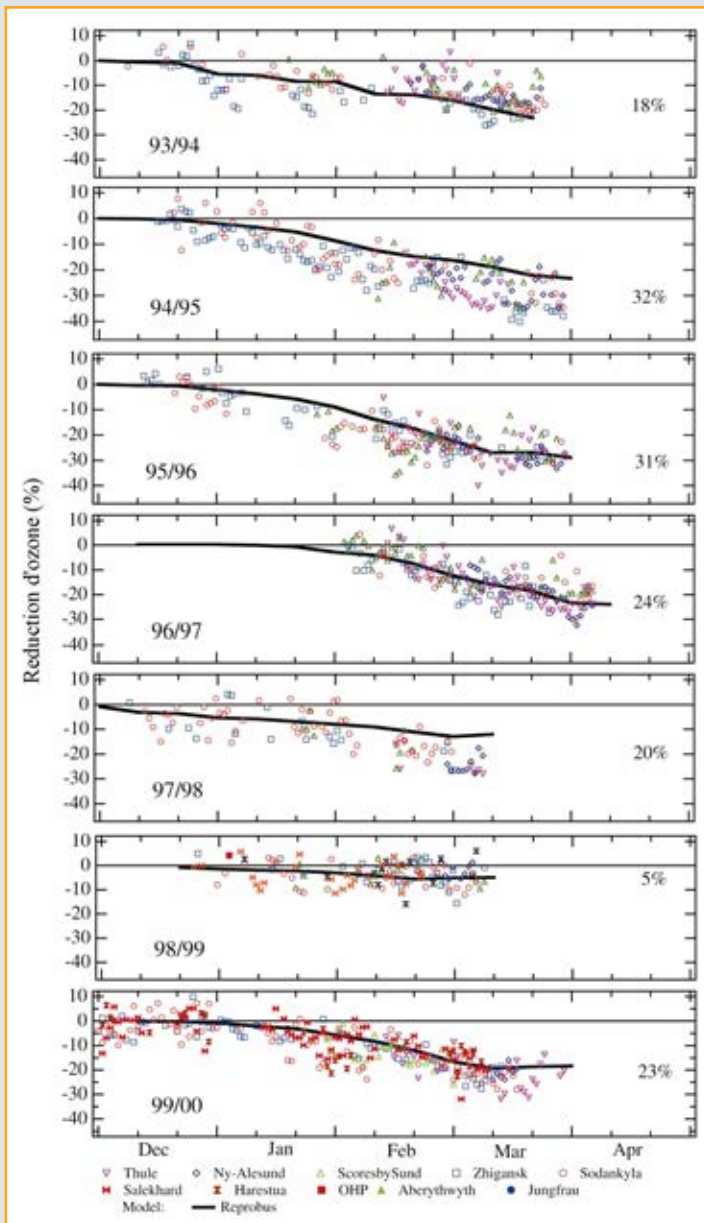
Bases de
données
et services
d'observation

réseaux

gestion de
données

La destruction photochimique de l'ozone dans le vortex Arctique est estimée chaque année par différence entre les mesures d'ozone total des stations du réseau mondial de stations au sol SAOZ et des simulations numériques du modèle REPROBUS où l'ozone est supposé être un traceur passif.

Une réduction significative de l'ozone stratosphérique est observée en Arctique, dont l'amplitude est directement liée à l'évolution de la température au cours de l'hiver. Une destruction maximale de 30% a été observée en 1996. (CNRS/SA)



Fonctionnement biogéochimique d'une colonne d'eau en méditerranée. Distribution verticale de la chlorophylle a, de la température et des nitrates sur la couche 0-25m depuis l'année 1991. (CNRS/Service d'observation DYFAMED)

Les bases de données

Le rapport du groupe de travail sur la gestion des bases de données pour les géosciences (GTBD), préparé en 1999 à la demande du CNES et de l'INSU, avait fourni dans ses conclusions des éléments de réflexion précis.

■ A partir de l'exemple des données spatiales, il a souligné l'écart qui peut s'instaurer entre une action d'offre de données, reposant souvent sur une filière courte de dépouillement des mesures faites par un capteur, et les aspirations des utilisateurs, qui ont vocation à se regrouper selon des champs thématiques et souhaitent disposer de données variées en provenance de différents capteurs sous une forme permettant leur utilisation combinée. Ce constat conduit à mettre en lumière l'importance de pôles de compétence capables de gérer la transition entre filières et champs thématiques.

Le groupe a recommandé entre autres la mise en place :

- ▶ d'une instance de concertation inter-organismes ;
- ▶ d'un "club" permettant, à l'exemple de l'organisation Eumetnet (regroupant les services météorologiques d'Europe de l'Ouest) l'échange et la coopération entre gestionnaires de bases de données. La tâche d'animation de ce club serait une manière concrète de construire, tout en commençant à les satisfaire, une estimation des besoins en assistance pour les gestionnaires de bases un peu isolées.

■ Le travail du GTBD s'est focalisé plus particulièrement, sur deux catégories extrêmes de données archivées : les séries longues à haut débit, illustrées par une filière de traitement d'un capteur spatial et les données de campagnes, regroupant des informations variées sur une période courte et unique.

■ Les campagnes coordonnées, nationales ou internationales, constituent l'un des moyens principaux pour obtenir des données, et l'un de ceux qui mobilisent le plus la communauté scientifique "océan et atmosphère". Le GTBD a recommandé à cet égard :

- ▶ une obligation systématique (largement pratiquée depuis quelques années au sein des programmes de l'INSU), dès la conception du projet, de prévoir la constitution d'une base de données organisée, documentée et accessible à tous ;
- ▶ l'appel si nécessaire, pour cette tâche, à un intervenant spécialisé.

■ S'agissant de la typologie des bases, le GTBD a identifié les centres de production (illustrés par le cas spatial), les centres de données (infrastructures qui assurent, indépendamment de la production, une gestion, une dissémination, un archivage de longue durée), et les bases de laboratoire qui visent à organiser

des données, en vue de satisfaire les besoins d'une communauté locale ou régionale.

■ Dans le cadre de l'exercice de prospective de l'INSU, cette réflexion a été étendue aux bases de données des services d'observation (SO). Les services et missions d'observation représentent précisément, la plupart du temps, le cas intermédiaire des longues séries non spatiales :

- ▶ la longueur des séries est une caractéristique propre des services d'observation ;
- ▶ les services d'observation de l'INSU en océan et atmosphère présentent tous la caractéristique d'intégrer des données issues de plusieurs capteurs et relatives à plusieurs paramètres ;
- ▶ le support de la longue durée d'acquisition présente une grande diversité : il peut s'agir de sites permanents, mais aussi de campagnes récurrentes, voire de séquences aéroportées récurrentes.

■ Les problèmes de mise en cohérence de ce type de collection ne sont donc pas nécessairement triviaux, même si la masse proprement dite des données n'est pas comparable à celle qui est fournie en général par une expérience spatiale. Toutefois, les services d'observation sont mis en œuvre par des équipes au sein de laboratoires de recherche, donc dans des structures plus légères et fragiles que les organismes nationaux spécialisés dans la gestion sur la longue durée.

■ Dans ces conditions, il est clair que les équipes de gestion des bases de données associées aux services d'observation ont vocation et avantage à constituer l'ossature principale de la participation de l'INSU au club des bases de données, afin de conjuguer expériences et compétences, et de réaliser le contact avec les gestionnaires de grandes bases nationales.

■ Les services d'observation ont très généralement une vocation de longue durée et une vocation internationale (matérialisée, du reste, par une insertion dans un réseau, le plus souvent). Donc, quelles que soient les étapes, l'objectif consiste à aboutir à une disponibilité des données sur une base "internationale" (française ou non) dûment répertoriée dans les grands catalogues internationaux.

■ L'évaluation périodique des services d'observation doit comporter un volet sur les bases de données et leur accessibilité. En particulier, lorsque les données brutes sont archivées localement, la sécurité de leur pérennisation est un devoir qui appelle un examen attentif. En fonction des éléments d'ensemble de la situation du service d'observation, une forte plus-value est conférée à la base si elle offre la capacité de construire de façon souple des produits élaborés, et se rapproche ainsi du concept "canonique" de pôle de compétence.

Les services d'observation et les tâches de service

Etat et intérêt des services d'observation

Le tableau ci-dessous récapitule la liste des services d'observation et tâches de service labellisés par l'INSU ainsi que leur mission, suite à l'évaluation de la CSOA, Commission Spécialisée Océan-Atmosphère.

Service d'observation	Mission
DYFAMED	Variabilité inter annuelle et décennale de la colonne d'eau méditerranéenne
SOMLIT	Réseau de surveillance des eaux côtières
OISO	Suivi des échanges air/mer de gaz carbonique
ROSAME	Réseau de suivi du niveau de la mer
NDSC/SAOZ	Réseau de suivi de la composition de la stratosphère
MOZAIC	Suivi de la composition atmosphérique par avions commerciaux
RAMCES	Réseau de suivi du contenu troposphérique en gaz à effet de serre
IDAF	Réseau de suivi de la composition des dépôts atmosphériques en Afrique de l'Ouest
AERONET	Réseau de suivi des propriétés des aérosols atmosphériques
Tâche de service	Mission
CTO	Expertise et algorithmie sur les produits altimétriques
Méso NH	Assistance et gestion du code de simulation atmosphérique à mésoéchelle

■ Au regard des documents de bilans et prospectives thématiques, il est clair que les services d'observation sont devenus une composante essentielle de la démarche de recherche. Depuis le colloque d'Hourtin (1993), ils ont permis dans bon nombre de nos disciplines de couvrir le manque de données de longue durée, souvent indispensables à la compréhension du fonctionnement de systèmes complexes. De plus, ils permettent d'intégrer (en combinaison avec d'autres outils) une certaine dynamique temporelle dans le traitement des questions scientifiques et donc de mieux cerner l'évolution des milieux et leurs déterminants.

■ Ces services d'observation semblent donc remplir leur double rôle : élément de production de données pour la recherche et surveillance de l'évolution de l'environnement.

■ Par ailleurs, l'examen des services d'observation labellisés par l'INSU fait ressortir l'absence dans le dispositif actuel de services d'observation dédiés aux surfaces continentales.

Les difficultés prévisibles

Ces services d'observation sont devenus aujourd'hui un élément incontournable du dispositif de recherche. Cet outil devra donc être maintenu et le nombre de ces services pourrait même être conduit à croître pour couvrir les besoins dans certains domaines.

■ Par ailleurs, le document INSU de février 1998 sur les services d'observation fait ressortir un réel besoin, pour nombre d'entre eux, de moyens humains supplémentaires pour mener à bien la tâche qui leur incombe.

■ Il semble donc que, pour maintenir des services d'observation de qualité et constituant de réels supports pour la recherche, le problème essentiel consistera à trouver les moyens nécessaires à leur fonctionnement dans les prochaines années.

Une nécessaire évolution du cadre structurel

La mission d'un service d'observation évolue en général avec le temps. On peut au minimum dégager deux phases différentes rythmant leur évolution :

- ▶ une phase d'initiation qui inclut la mise en place (avec ce que cela recouvre de définition des sites, d'adaptation des instruments et d'optimisation des mesures) et l'exploitation "recherche" des premières années de données acquises. Cette phase est sans ambiguïté du domaine de la recherche et relève naturellement à ce titre d'organismes de recherche comme l'INSU ;
- ▶ une seconde phase où l'objectif principal est d'assurer la collecte de séries de données de qualité et d'assez longue durée. Cela correspond pour l'essentiel à deux types de besoins :

- faire ressortir les tendances évolutives de phénomènes continus ou intermittents, en particulier pour ceux qui présentent de faibles signaux,
- assurer une surveillance contractuelle ou opérationnelle.

Cette deuxième phase inclut donc des missions de natures différentes. Ainsi, les activités rentrant dans le cadre d'une contrainte contractuelle internationale (type convention internationale sur la surveillance de l'ozone stratosphérique ou des gaz à effet de serre...) relèvent au premier chef des ministères ayant la responsabilité de la mise en œuvre de ces conventions. En fait, l'INSU assure une "délégation" technique pour la mise en œuvre de ces obligations contractuelles mais sans réelle affectation de moyens, en particulier contractuels. Cette situation doit être éclaircie ; il semble nécessaire de rétablir le niveau de responsabilité de chacun, et donc son niveau d'engagement.

D'autres services d'observation peuvent également assurer des missions relevant en phase 2 plus directement d'autres organismes : on devrait alors examiner les possibilités de transfert de la responsabilité principale.

■ Enfin, il apparaît que la plupart de ces SO ont une vocation internationale. Certains d'entre eux sont déjà inclus dans des réseaux mondiaux. D'autres auraient vocation à servir de points de développement de réseaux européens. Il existe sans doute un espace dans les appels d'offre européens (par exemple les infrastructures communes) permettant d'inscrire certains services d'observation dans le cadre programmatique de la Communauté Européenne.

■ Les problèmes de personnel

Sur le plan des moyens en personnel scientifique et technique, un examen des besoins, tels qu'ils apparaissent dans le document de l'INSU de février 98, montre que ceux-ci ne pourront être raisonnablement assurés par les seuls moyens de l'Institut.

■ La politique du CNAP (Conseil National des Astronomes et Physiciens) doit être plus volontariste de manière à accompagner la phase de croissance des Services d'Observation récents (affichage des priorités au niveau national et ouverture de postes en fonction de ces priorités). Par ailleurs, nombre de ces services

ont fonctionné avec des VAT qui vont disparaître à très brève échéance, et aucune solution de remplacement n'a pas été trouvée.

■ L'instrumentation associée

Le passage en mode autonome pour la mesure de propriétés environnementales doit être encouragé. L'automatisation de certains instruments dédiés à l'observation *in situ* a été engagée. D'autres capteurs sont en cours de développement et des campagnes de tests et de calibration seront nécessaires avant leur utilisation en mode opérationnel. Le contrôle de qualité des données réceptionnées, les étalonnages pré et post-campagne, nécessitent des postes dédiés. Dans les prochaines années, ces besoins, dédiés à l'automatisation, s'ajouteront aux demandes prononcées par les services d'observation.

■ En conclusion, sans évolution du cadre structurel dans lequel évoluent les services d'observation (SO), il est certain que la communauté va être confrontée à de graves problèmes de gestion et de soutien de ces outils de recherche. Au-delà des quelques pistes mentionnées, la conclusion essentielle est qu'il faut réellement définir une politique nationale inter-organismes sur les SO, en précisant les missions et charges de chacun et en imaginant les voies permettant de dégager de façon commune des moyens stables et adaptés.

flux

ITA

Évolution
des structures
et des
ressources
humaines

chercheur

laboratoire

Ressources humaines

Les données qui ont été utilisées pour établir cette partie du rapport ont été fournies par les directeurs des unités de recherche dépendant du département Sciences de l'Univers (SDU) du CNRS et rattachées en tout ou en partie à la division "Océan-Atmosphère". Le nombre de laboratoires qui a répondu à l'enquête est de 35, ce qui représente la quasi-totalité des effectifs. Cette enquête répond à deux objectifs principaux :

- ▶ établir une photographie la plus fidèle possible de la situation au 1er janvier 2000 des ressources humaines dans sa totalité et par catégories ;
- ▶ connaître les flux de ces dernières années autant au niveau des chercheurs que du personnel technique et administratif.

■ Un point à signaler est le fait que cette enquête permet de connaître non seulement les ressources en personnels CNRS, mais aussi en personnels des autres organismes. En revanche, elle ne permet pas de connaître les ressources réelles de la communauté française, puisque les personnels non rattachés à des équipes reconnues par le CNRS ne sont pas recensés.

Les chercheurs

Les données collectées sont :

- ▶ la liste des chercheurs de chaque laboratoire, leur âge et leur organisme d'appartenance ;
- ▶ l'appartenance à une sous-discipline : atmosphère ; océanographie ; côtier ; surface continentale, climat et "paléo" (i.e. paléocéanographie-paléoclimatologie) ;
- ▶ leur qualité de modélisateur ou d'expérimentateur.
- ▶ les mouvements enregistrés depuis 1992 (arrivées, départs, par sous-discipline).

■ Le nombre de chercheurs concernés est de 836, répartis dans 35 laboratoires (7 en région parisienne et 28 en province).

Situation actuelle

La première information globale est celle de la répartition des chercheurs par organismes (figure 1). Les populations universitaire (42,2 %) et CNRS (41 %) sont pratiquement à égalité. Celle des autres organismes (dans les laboratoires rattachés au CNRS) étant de 16,8 %.

■ La figure 2 donne l'histogramme de répartition des chercheurs par laboratoire. On constate que sur les 35 laboratoires concernés, 4 ont plus de 40 chercheurs permanents et 18 ont entre 20 et 40 chercheurs dans les disciplines Océan-Atmosphère.

■ La deuxième information intéressante est la répartition entre les 6 sous-disciplines qui ont été définies. Les populations par ordre décroissant sont : l'océan (28,4 %), l'atmosphère (23,9 %) ; le côtier (17,1 %), les surfaces continentales (15,3 %), "la paléo" (10,5 %) et le climat (4,8 %).

■ On remarque la faible population de chercheurs se réclamant des études sur le climat, mais on peut penser qu'une grande partie des "paléo" est directement concernée par ce thème. De plus des chercheurs travaillant dans les autres thèmes, peuvent relever également du climat.

Figure 1

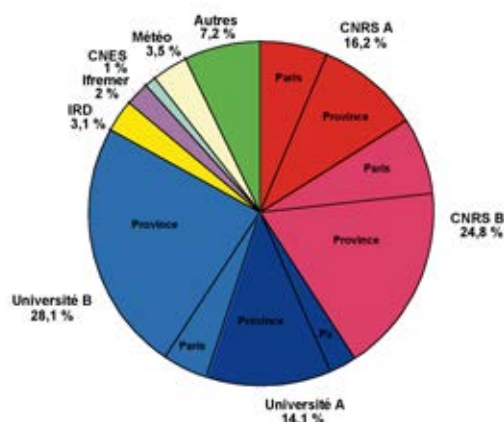
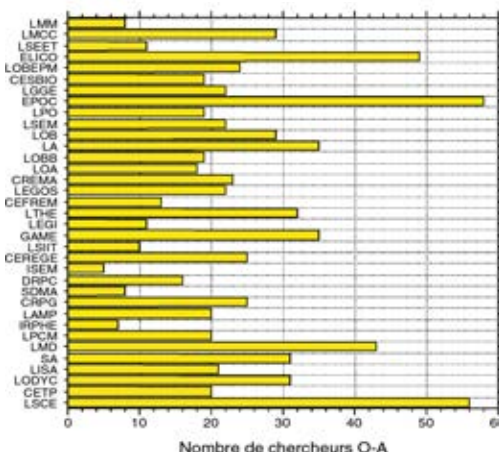


Figure 2



• Évolution des structures et des ressources humaines

■ Si on s'intéresse à la répartition de ces sous-disciplines dans les laboratoires (figures 3, 4, 5, 6, 7, 8), on constate :

Figure 3

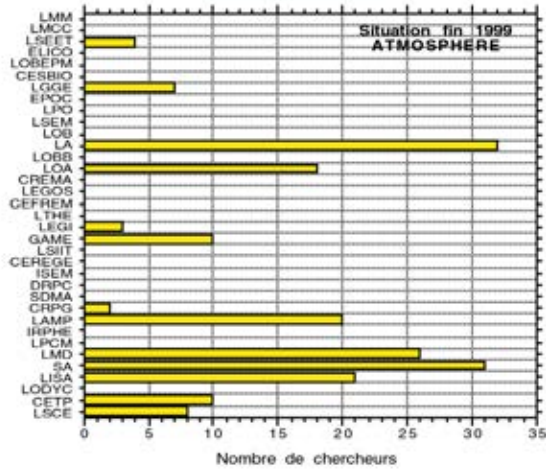


Figure 4

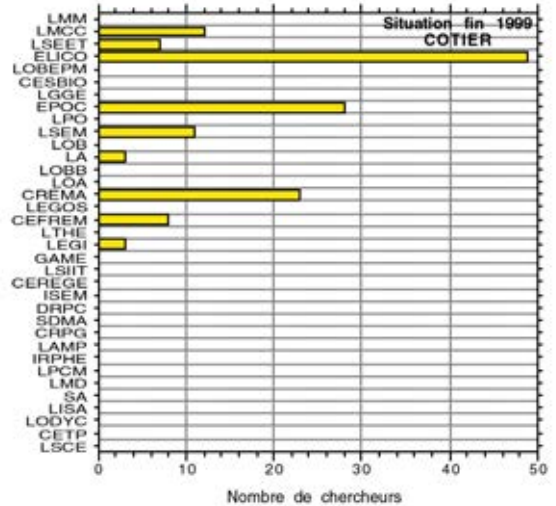


Figure 5

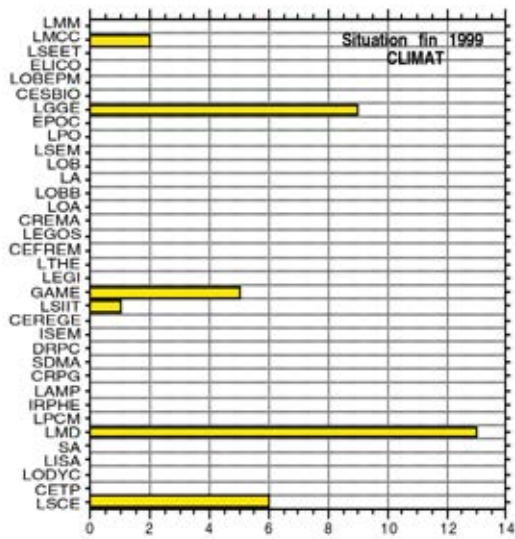


Figure 6

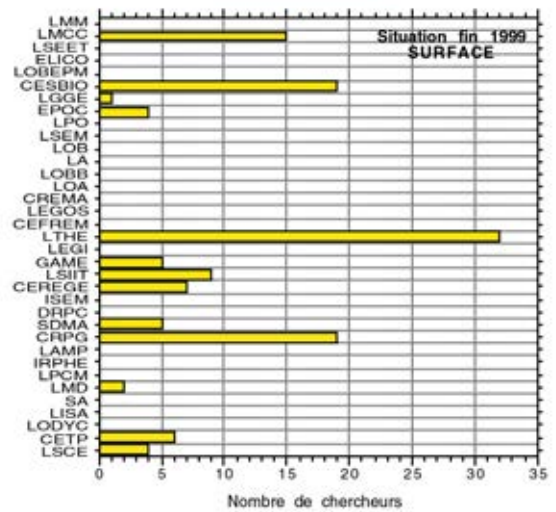


Figure 7

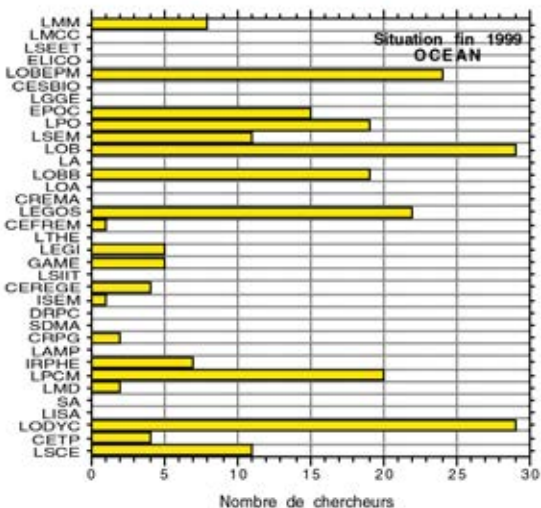


Figure 8

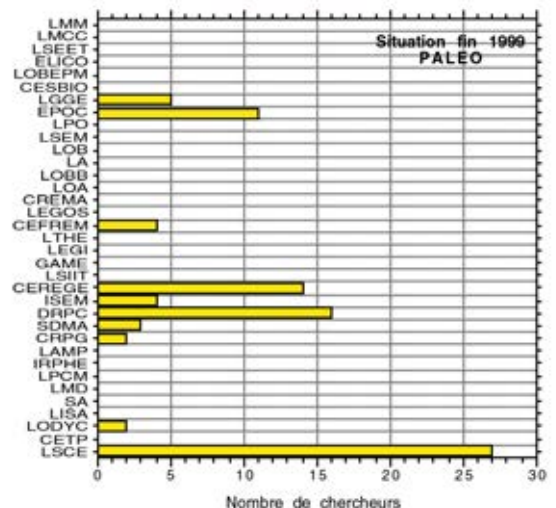


Figure 9

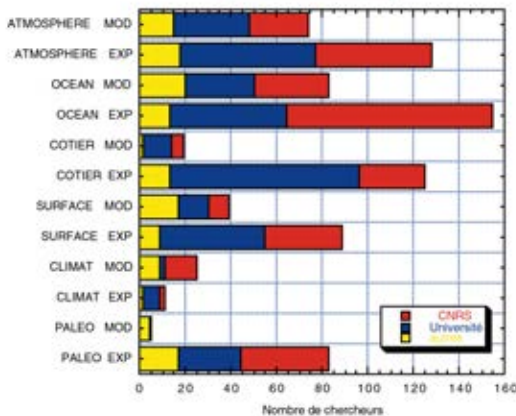
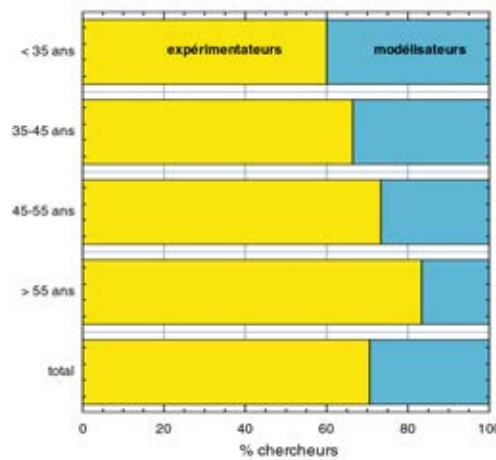


Figure 10



► 13 laboratoires font des recherches atmosphériques, mais 2/3 des chercheurs sont dans 5 laboratoires avec plus de 20 chercheurs chacun;

► 6 laboratoires hébergent les recherches sur le climat, mais 80 % se trouvent dans 3 laboratoires ; l'océanographie est étudiée dans 20 laboratoires, mais, 2/3 des chercheurs concernés sont dans 7 de ces laboratoires;

► l'océanographie côtière est représentée dans 9 laboratoires, mais on peut s'étonner que tous les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) marins ne soient pas dans cette liste;

► les sciences de la surface continentale (la fraction en interface avec l'atmosphère ou l'océan) sont représentées dans 13 laboratoires, mais 2/3 des chercheurs se trouvent dans 4 laboratoires;

► enfin, les recherches en paléontologie sont présentes dans 10 laboratoires avec une forte concentration (77 %) dans 4 laboratoires.

■ Un autre renseignement intéressant est celui de la répartition entre modélisateurs et expérimentateurs au sens large. Une remarque doit être faite sur cette séparation compte tenu du fait que, de plus en plus, cette double compétence peut correspondre à un même chercheur. Nous avons opté pour garder cette séparation (chacun se définissant comme il le souhaite) qui permet de tirer un certain nombre de renseignements statistiques. Ainsi, si on regarde la répartition entre modélisateurs et expérimentateurs par sous-disciplines et par organismes (figure 9), on voit que :

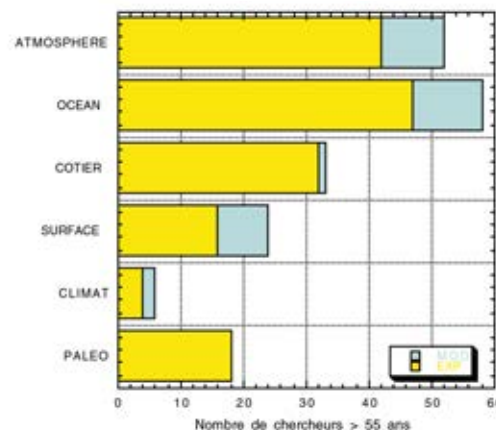
► la proportion de modélisateurs est très différente suivant la sous-discipline. La plus forte proportion à l'intérieur de chaque sous-discipline se trouve dans le climat (69 %) tandis que la proportion est plus faible dans l'océan (35 %), dans l'atmosphère (36 %) et dans la surface (30 %) et très faible dans le cas du côtier (13 %) et de la "paléo" (6 %);

► la répartition des chercheurs modélisateurs entre le CNRS et l'Université est à peu près identique.

■ En ce qui concerne la répartition par tranche d'âge (figure 10), on constate que la proportion de modélisateurs est plus forte dans les tranches d'âge plus jeunes : 40 % dans la tranche d'âge de moins de 35 ans et 20% dans celle supérieure à 55 ans.

■ Enfin, dernier paramètre intéressant, le renouvellement des populations. Pour avoir une projection sur les futurs départs à la retraite, on a considéré la tranche d'âge supérieure à 55 ans. C'est une population de 191 chercheurs qui partira dans les 10 prochaines années. La figure 11 montre la répartition de cette population par sous disciplines, qui est assez différenciée. Les pourcentages les plus forts correspondent à l'atmosphère (27 % de départs), à l'océan et à l'océan côtier (24 % chacun) et à la paléo (20 %) ; les plus faibles aux sciences de la surface (18 %) et au climat (13 %). Ce sont des données dont il faudra tenir compte dans les recrutements prévus ces prochaines années.

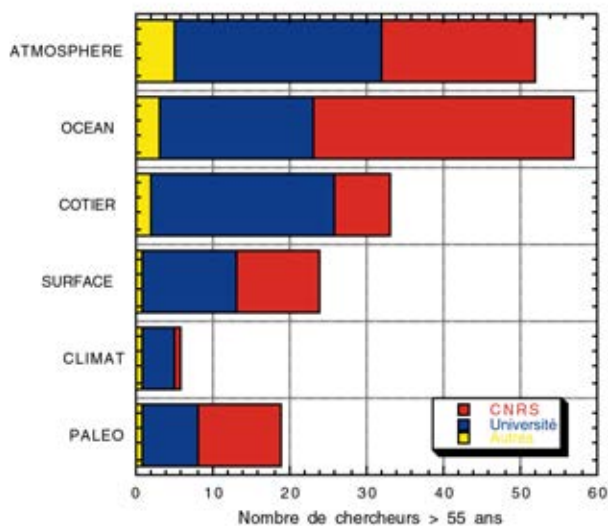
Figure 11



• Évolution des structures et des ressources humaines

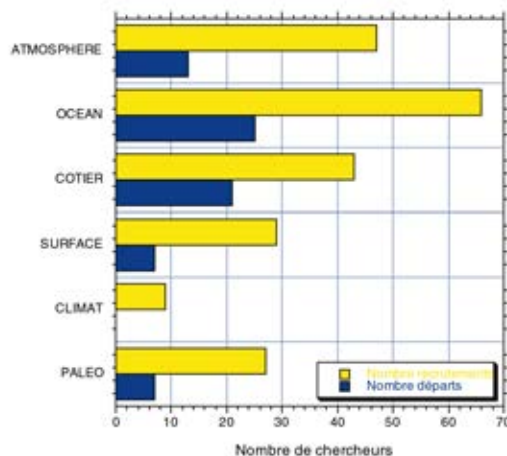
■ Les procédures de recrutement n'étant pas les mêmes suivant les organismes, nous avons représenté la répartition de cette population des plus de 55 ans par organismes (figure 12). On constate une répartition équilibrée entre CNRS et Université pour l'atmosphère et les sciences de la surface, et plus important du côté CNRS pour l'océan, tandis que les départs dans le côtier sont majoritairement du côté de l'Université.

Figure 12



■ Si on regarde comment ce bilan net se répartit entre les sous-disciplines, on constate des différences significatives (figure 14). Si on prend comme référence les populations de 1992, les progressions les plus fortes en valeur relative sont celles de la "paléo" (29.4 %) et du climat (24 %), tandis que les autres disciplines ont des pourcentages d'augmentation assez voisins : 21.5 % pour l'atmosphère et pour l'océan ; 20 % pour les surfaces continentales et 18 % pour le côtier.

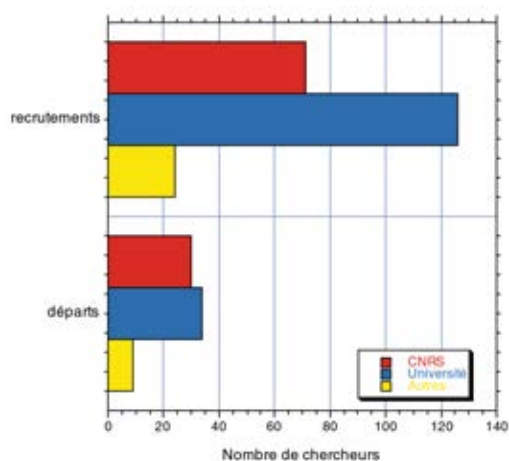
Figure 14



Les flux

Le premier élément important est le bilan net du nombre de chercheurs entre 1992 et 1999. Toutes disciplines confondues, le bilan net correspond à un accroissement de 148 chercheurs, soit 20 % sur 8 ans (figure 13). Dans cette augmentation, 62 % provient de l'Université, 28 % du CNRS et 10 % des autres organismes. On constate que ce sont les Universités qui ont contribué majoritairement à cet accroissement et que ceci n'est pas lié à une politique nationale, mais plutôt à l'addition de situations locales et surtout au fort recrutement d'enseignants-chercheurs ces dernières années.

Figure 13



Le personnel technique et administratif

Les données collectées sont :

- ▶ la liste des personnels de chaque laboratoire, leur âge et leur organisme d'appartenance;
- ▶ leur répartition en quatre fonctions : moyens généraux, instrumentation, expérimentation, informatique;
- ▶ les mouvements enregistrés depuis 1992.

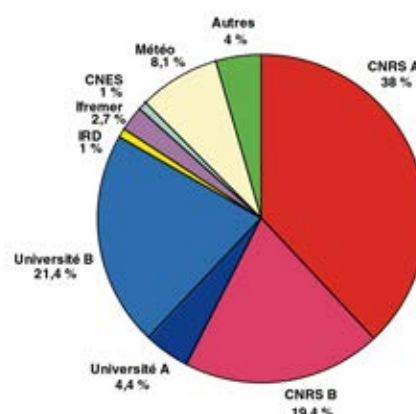
Le nombre de personnes concernées est de 810, répartis dans les mêmes 35 laboratoires.

■ Situation actuelle

L'effectif total est de 810 personnes (à comparer au chiffre de 836 chercheurs du paragraphe précédent). Une partie significative de ces agents (108 agents, soit 13 %) est affectée dans des structures fédératives (OSU et fédérations), ce qui n'est pas le cas pour les chercheurs.

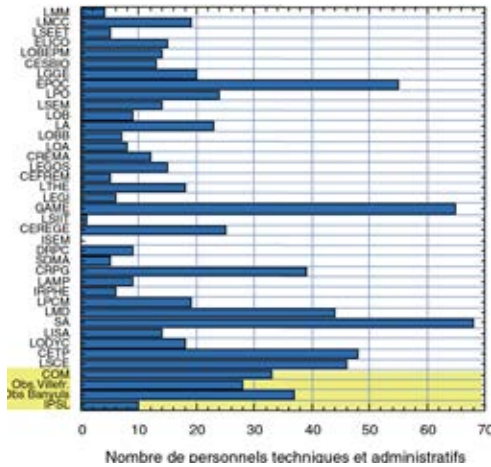
La répartition par organismes (figure 15) est de 57.4 % d'agents CNRS, 25.8 % d'agents des universités et 16.8 % des autres organismes.

Figure 15



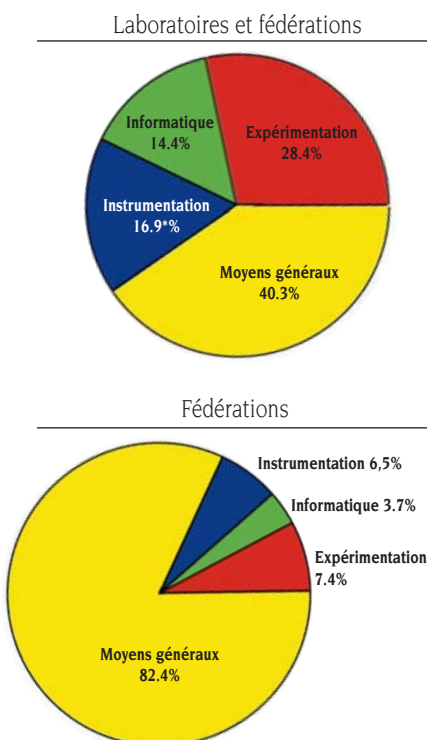
■ La figure 16 montre l'histogramme de répartition des agents par laboratoire et dans les structures fédératives. Sur les 35 laboratoires considérés, 6 ont plus de 40 personnes affectées aux disciplines Océan-Atmosphère.

Figure 16



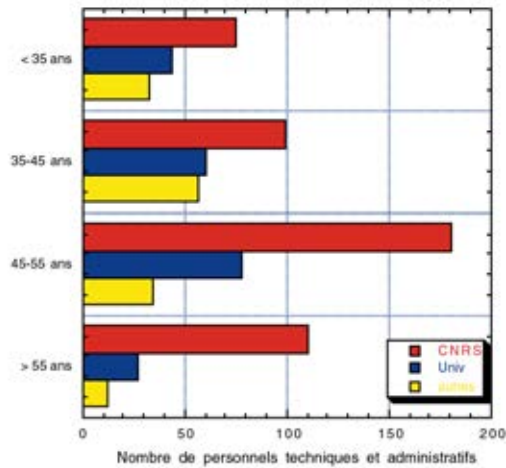
■ Si on s'intéresse à la répartition par fonctions de l'ensemble de la population (figure 17), on constate que 40.3 % sont affectés aux moyens généraux, ce qui peut sembler *a priori* très important ; mais sur ces 326 agents, 27.3 % sont dans des structures fédératives. L'affectation aux autres fonctions par ordre décroissant est : 28.4 % à l'expérimentation, 16.9 % à l'instrumentation et 14.4 % à l'informatique.

Figure 17



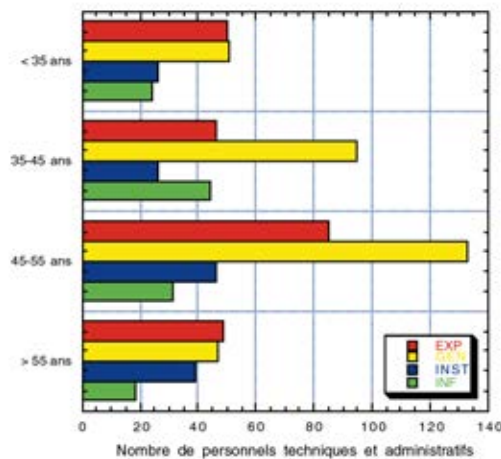
■ La répartition par tranches d'âge (figure 18) est différente suivant les organismes d'appartenance. Ainsi la majorité des agents du CNRS, qui apporte plus de la moitié du potentiel des laboratoires, est dans la tranche d'âge supérieure à 45 ans ; ce phénomène de vieillissement est moins marqué dans les autres organismes.

Figure 18



■ Si on regarde la répartition par tranches d'âge et par fonctions (tous organismes confondus), trois faits sont à signaler (figure 19) :

Figure 19



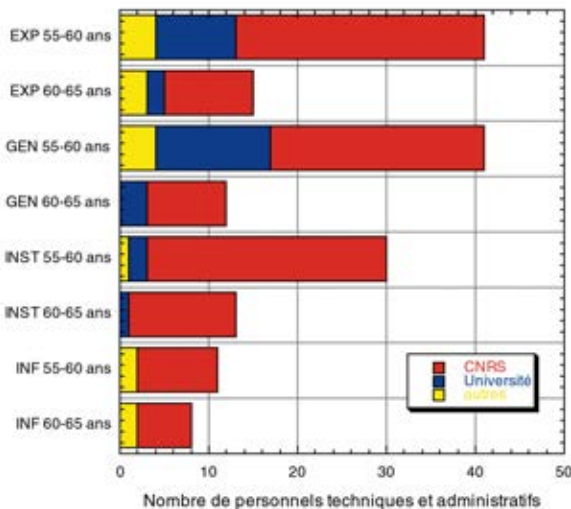
- ▶ la très forte proportion des 45-55 ans dans la fonction de "moyens généraux";
- ▶ la jeunesse relative de la population des informaticiens (maximum à 35-45 ans);
- ▶ le vieillissement de la population des instrumentalistes.

• Évolution des structures et des ressources humaines

■ En ce qui concerne les départs à la retraite, 171 agents (21 %) vont partir dans les dix ans à venir. Et une grande proportion de ces départs (73 %) correspond à des agents CNRS.

■ Si on examine la population d'âge supérieur ou égal à 55 ans pour chaque fonction (figure 20), on constate que les départs dans les 10 ans à venir représenteront une part importante de l'effectif fin 99 : 31.4 % dans l'instrumentation, 24.3 % dans l'expérimentation, 16.2 % dans les moyens généraux et dans l'informatique.

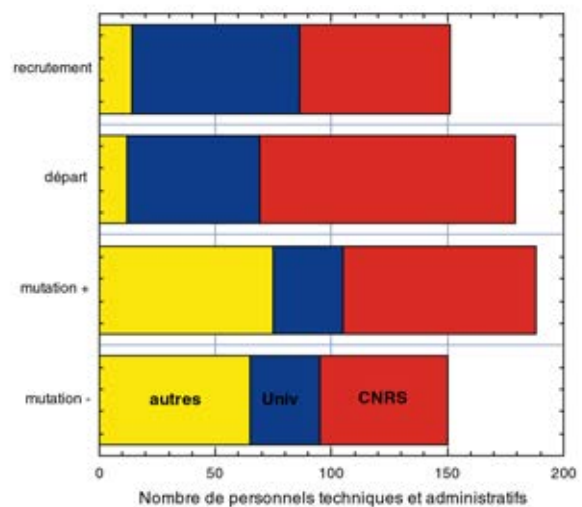
Figure 20



■ Les flux

Le bilan net des flux depuis 1992 correspond à un gain de 10 agents (à comparer avec le gain net de 148 chercheurs), soit une dégradation importante du rapport ITA/chercheur. Ce bilan net est différent suivant les organismes (figure 21) : perte de 17 agents CNRS, gain de 15 agents de l'Université et de 12 des autres organismes. En valeur relative, ceci correspond à une perte de 3.5% d'agents CNRS sur la période 1992-99, à un gain de 7.7 % d'agents Université et de 9.6 % d'agents des autres organismes.

Figure 21



Évolution des structures de recherche

Contexte et tendances à la fin du XXe siècle

Les structures de recherche jouent un rôle important dans le progrès et l'application des connaissances. Elles s'adaptent en permanence à l'évolution des sciences et techniques. La précédente décennie a été marquée pour la communauté Océan-Atmosphère par un développement spectaculaire de grands programmes pluridisciplinaires inter-organismes, très souvent à dimension planétaire (IGAC, TOGA, WOCE, PAGES, JGOFS, missions spatiales...). Ceci n'a pas été sans conséquence sur l'organisation de la recherche. Le souci de mieux gérer le caractère pluridisciplinaire des programmes ou la recherche d'économie d'échelle sur les moyens lourds et mi-lourds a souvent conduit à la création d'unités de recherche de grande dimension et/ou à des structures fédératives. La reconnaissance de liens forts avec le dispositif universitaire de recherche, lui-même imbriqué dans le dispositif de formation doctoral, constitue également l'une des tendances lourdes de la fin de la précédente décennie (création des UMR). Enfin l'accès aux financements européens a constitué l'un des facteurs déterminants de l'organisation de la recherche, au-delà d'un cadre strictement national, sous forme de création de réseaux de recherche (cycle du CO₂, étude des marges continentales, Méditerranée, forages glaciaires et marins...).

Perspectives/questions pour le début du XXIe siècle

Sept lignes de force risquent d'avoir un impact sur l'organisation de la recherche dans la prochaine décennie.

■ L'impérieuse nécessité de favoriser et organiser les recherches les plus novatrices

La volonté des organismes, CNRS et Direction de la Recherche (DR)/MEN est de soutenir les démarches "innovatrices", face aux grands programmes réputés plus "conservateurs". Ceci se traduit par la mise en œuvre d'opérations spécifiques sous forme de "coups de pouce", "d'actions incitatives programmées" (ACI), "d'actions thématiques innovantes" (ATI), éventuellement liées à la pression sociétale. Ces opérations spécifiques, très sélectives, mettent à la disposition de jeunes chercheurs ou enseignants-chercheurs des moyens financiers conséquents pour créer de nouvelles dynamiques au sein d'unités de recherche existantes.

■ Compte tenu de son impact possible en terme de déplacement du centre de gravité scientifique de certaines unités de recherche, des questions se posent cependant sur les limites de cette démarche

"innovatrice", sur son caractère "déstructurant" par rapport aux thématiques de recherche évaluées dans le cadre des contrats quadriennaux, et sur le caractère antinomique de cette démarche par rapport à la mobilisation récurrente des unités de recherche dans les programmes pluridisciplinaires nationaux et internationaux.

■ Le développement et l'organisation de la fonction "observation"

Dans les domaines des sciences du climat, de l'atmosphère, de l'océan (aspects hauturier et côtier) et des surfaces continentales le développement des services d'observation et des observatoires a permis un profond renouvellement des concepts. Il s'agit d'une tendance lourde pour la période actuelle et à venir.

■ Au sein de l'INSU et du département SDU (Science de l'Univers) du CNRS, et contrairement à d'autres organismes de recherche, la volonté de maintenir fort le lien entre les unités de recherche et les services d'observation est largement réaffirmée. Aujourd'hui ce lien est cependant "questionné". La recherche dans ces disciplines s'appuie en partie sur la mise en place de réseaux d'observation qui actuellement reposent peu sur des structures opérationnelles. Leur fonctionnement est souvent précaire et ne bénéficie pas des recrutements nécessaires du côté du CNAP pour garantir une certaine pérennité. La restructuration et la fédération de Réseaux d'Observation des différents organismes d'Etat (sans compter les initiatives prises à l'échelle régionale) ne risque-t-elle pas d'induire une autonomisation de services d'observation par rapport aux structures de recherche ?

■ Le développement de liens forts "formation-recherche"

Le développement de liens structurés "formation" - "recherche" est amorcé depuis le début de la précédente décennie. Les échanges structurels avec l'Université se sont renforcés. Ils permettent notamment de meilleurs liens par l'intermédiaire d'enseignements "à la pointe" de la part des chercheurs, des recherches communes avec les enseignants-chercheurs et l'encadrement de doctorants, qui sont les chercheurs de demain. Si cette démarche n'est évidemment pas propre au département SDU, elle a cependant pris un relief particulier par la transformation de plusieurs UPR en UMR. Ce processus n'est probablement pas achevé. Mais, il faut veiller à ce que cette forte interpénétration entre le CNRS et les Universités ne conduise pas à l'affaiblissement de la politique nationale dans des domaines de la recherche qui ne peuvent pas être morcelés, si on veut continuer à garder un rang international.

■ Le positionnement/la structuration de la recherche française dans le contexte européen

Au niveau de l'Europe, malgré la coopération scientifique en cours depuis plusieurs décennies entre les unités de recherche sur programmes ou autour d'équipements lourds communs, la structuration de la recherche reste organisée sur une base essentiellement nationale. Pourtant les importants financements européens obtenus par les unités de recherche du département SDU, ont conduit à la mise en place de réseaux de recherche et de recherche/formation. Faut-il en rester à ce stade d'organisation légère et flexible ou faut-il passer à un stade plus structuré : développement de laboratoires européens associés, émergence de pôles régionaux européens (autour d'équipements ou de thèmes communs) sous forme d'accord bilatéraux (ex : MPI-CNRS ; NERC-CNRS)? Création d'instituts de recherche multinationaux ? L'ouverture européenne n'est pas un but en soi, mais elle devrait être un atout de dynamisme pour éviter l'isolement de disciplines. Il convient toutefois de garder une certaine lisibilité thématique à l'échelle nationale. Pourquoi ne pas envisager la création de centres virtuels thématiques européens grâce à l'utilisation de nouveaux outils de communications interactifs par le biais de liaisons à très haut débit ? Ces centres pourraient avoir un fort caractère multidisciplinaire et servir de passerelles auprès des entreprises.

■ L'organisation de la nécessaire interdisciplinarité

Les programmes nationaux et internationaux créent par nécessité des problèmes d'interface entre disciplines. L'interdisciplinarité sur un sujet commun est indispensable au sein d'un même laboratoire. Il faut privilégier la pluridisciplinarité tout en veillant à diminuer le nombre de thèmes différents à l'intérieur d'une même structure. Cette évolution générale demande une mutation profonde de l'approche des chercheurs et des structures. Le cloisonnement des systèmes publics de recherche, et en particulier le compartimentage du CNRS en départements verticaux (Sciences de la vie, Sciences de l'Univers, Sciences pour l'Ingénieur, Sciences Humaines et Sociales ...) ne tend-il pas à instaurer des barrières disciplinaires qui nuisent à une transversalité devenue nécessaire ? Le contact du SDU avec les autres départements est maintenant indispensable dans la plupart des sous-thèmes de nos disciplines. Bien que l'interfaçage soit croissant, avec un effort certain par l'intermédiaire de fléchages interdisciplinaires, les échanges inter-départements au niveau des structures et des programmes doivent être considérablement renforcés.

• Évolution des structures et des ressources humaines

■ L'organisation de l'ouverture vers la demande sociale

Les laboratoires restent mal organisés pour répondre à la demande sociale concernant l'environnement et les ressources naturelles, thème fort dans nos disciplines. La question du relais entre recherche fondamentale et application directe est cruciale dans un domaine où les questions socio-économiques représentent un enjeu important. Les tentatives d'insertion des sciences humaines et sociales dans nos programmes se sont le plus souvent avérées difficiles. Les deux objectifs ne sont pas toujours compatibles et demandent un investissement humain conséquent. Faut-il envisager des structures intermédiaires entre laboratoires de recherche et institutions socio-économiques adaptées à ces demandes ?

■ Une organisation plus rationnelle de la gestion des données et des grands codes

La gestion des données et grands codes représente un enjeu essentiel pour le présent et le futur. La communauté des chercheurs doit réfléchir aux structures, aux moyens humains et informatiques les plus appropriés pour assurer le stockage et l'utilisation optimale des données satellitaires et données *in situ* issues de campagnes d'envergure, menées en partie par le CNRS. Le contexte international est dominant. Sur ce problème essentiel des bases de données et de leur exploitation, la réflexion commune au CNES et au CNRS menée récemment (voir chapitre correspondant) a permis d'apporter un certain nombre de réponses. Ne faut-il pas mener un effort analogue de réflexion sur les moyens structurels et humains à dégager, et sur les tâches d'optimisation continue des grands codes de calcul développés par les chercheurs sur les plates-formes et architectures informatiques en évolution permanente ? Cette tâche devient difficile à l'échelle d'un seul laboratoire, dans la mesure où les codes sont élaborés en coopération et où les moyens humains restent insuffisants. Une réflexion structurelle s'impose car l'optimisation et la maintenance de ces outils, indispensables à l'étude de l'environnement et de l'évolution du climat, ne pourra à terme plus être assurée.

laboratoires

unités
de
recherche

Glossaire

Laboratoires

agences

programmes

Principaux programmes et organismes cités dans le texte

■ Grands programmes de recherche nationaux

GICC - Gestion et Impact du Changement Climatique
LITEAU - Programme sur la gestion durable du littoral
PATOM - Programme Atmosphère et Océan à Moyenne Echelle
PNCA - Programme National Chimie Atmosphérique
PNEC - Programme National Environnement Côtier
PNEDC - Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat
PNRH - Programme National de Recherche en Hydrologie
PNSE - Programme National de recherche Sol, Erosion
PROOF - Programme processus biogéochimiques dans l'océan et flux

■ Grands programmes de recherche internationaux

PMRC/WCRP

Programme mondial de recherche sur le climat

CLIVAR - CLImate VARIability and Predictability
GODAE - Global Ocean Data Assimilation
TOGA - Tropical Ocean and Global Atmosphere
WOCE - World Ocean Circulation Experiment

PIGB/IBGP

Programme international Géosphère Biosphère

GAIM - Global Analysis, Interpretation and Modelling
GLOBEC - Global Ocean Ecosystems Dynamics
IGAC - International Global Atmospheric Chemistry Programme
IHDP - International Human Dimensions of Global Environmental Change Programme
IMAGES - International Marine Global ChanGES
JGOFS - Joint Global Ocean Flux Study
LOICZ - Land Ocean Interactions in the Coastal Zones
OCMIP - Ocean Carbon Model Intercomparison Project
PAGES - PAsT Global ChanGES Experiment
PMIP - Paleoclimate Model Intercomparison Programme

■ Ministères et agences de moyens et de programmation

ADEME - Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
CNES - Centre National d'Etudes Spatiales
INSU - Institut National des Sciences de l'Univers
IFRTP - Institut Français de Recherche et Technologie Polaires
MATE - Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MR - Ministère de la Recherche

■ Organismes de recherche français

CEA - Commissariat à l'énergie atomique
CERFACS - European Center for Research and Advanced Training in Scientific Computation
CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique
IFREMER - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IRD - Institut de Recherche pour le Développement
MEN/Universités - Ministère de l'Education Nationale
MÉTÉO FRANCE
SHOM - Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

Laboratoires Océan-Atmosphère-Climat

Laboratoires SDU

CEFREM - Centre de Formation et de Recherche sur l'Environnement Marin - Perpignan
 CEREGE - Centre Européen de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement - Aix en Provence
 CERFACS - Sciences de l'Univers au CERFACS - Toulouse
 CESBIO - Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère - Toulouse
 CETP - Centre d'Etudes des Environnements Terrestre et Planétaires - Vélizy
 COM - Centre d'Océanologie de Marseille - Marseille
 CREMA - Centre de Recherche en Ecologie Marine et Aquaculture de l'Houmeau - Nieuil-sur-Mer
 CRPG - Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques - Vandoeuvre les Nancy
 DRPC - Dynamique des Récifs et des Plates-formes Carbonatées - Marseille
 ELICO - Ecologie des Systèmes Littoraux Perturbés du Nord Pas de Calais - Wimereux
 EPOC - Environnements et Paléoenvironnements Océaniques - Talence
 GAME - Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique - Toulouse
 IPSL - Institut Pierre-Simon-Laplace - Guyancourt
 LA - Laboratoire d'Aérodynamique - Toulouse
 LAMP - Laboratoire de Météorologie Physique - Clermont-Ferrand
 LBCM - Laboratoire de Biogéochimie et Chimie Marines - Paris
 LEGOS - Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales - Toulouse
 LGGE - Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement - Saint-Martin-d'Hères
 LISA - Laboratoire Inter-universitaire des Systèmes Atmosphériques - Créteil
 LMCC - Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière - Caen
 LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique - Palaiseau
 LMM - Laboratoire de Microbiologie Marine - Marseille
 LOA - Laboratoire d'Optique Atmosphérique - Villeneuve d'Ascq
 LOB - Laboratoire d'Océanographie et de Biogéochimie - Marseille
 LOBB - Laboratoire d'Océanographie Biologique de Banyuls - Banyuls
 LOBEPM* - Laboratoire Océanographie Biologique et Ecologie du Plancton Marin - Villefranche-sur-Mer
 LODYC - Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climatologie - Paris
 LPCM** - Laboratoire de Physique et Chimie Marines - Villefranche-sur-Mer
 LPO - Laboratoire de Physique des Océans - Brest
 LSCE - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement - Gif sur Yvette
 LSEET - Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre - Toulon
 LSEM/LEMAR - Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin - Plouzané
 LTHE - Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement - Grenoble
 OOB - Observatoire Océanologique de Banyuls - Banyuls
 OOV - Observatoire Océanologique de Villefranche - Villefranche sur mer
 OMP - Observatoire Midi-Pyrénées - Toulouse
 SA - Service d'Aéronomie - Verrières le Buisson
 SDMA*** - Laboratoire Sédimentation et Diagenèse de la Matière Organique - Orléans

Laboratoires d'autres départements du CNRS

IRPHE - Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre - Marseille
 ISEM - Institut des Sciences de l'Evolution - Montpellier
 LEGI - Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels - Grenoble
 LSIT - Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection - Illkirch Graffenstaden

* En 2001, le LOBEPM a été intégré dans la nouvelle unité LOV - Laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer

** En 2001, une partie du LPCM a été intégrée dans la nouvelle unité LOV - Laboratoire Océanologique de Villefranche sur Mer

*** SDMA est devenu ISTO en 2000 - Institut des Sciences de la Terre d'Orléans



INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

3, rue Michel-Ange - BP 287 - 75766 Paris cedex 16
<http://www.insu.cnrs-dir.fr>

Juin 2001