

PLANÈTE TERRE : ENVELOPPES SUPERFICIELLES

PRÉAMBULE

JEAN-CLAUDE DUPLESSY

Président de la section

PATRICK BUAT-MÉNARD

Rapporteur

Christian Allet

Bruno Ambroise

François Blanc

François Brissaud

Jean-Maurice Cases

Guy Cautenet

Jean-Dominique Creutin

Yves Fouquart

Daniel Guédalia

Danièle Hauser

Alain Herbland

Philippe Larque

Christian Le Provost

André Mariotti

Catherine Pierre

Michel Pirre

Henri Poncet

Georges-Henri Sala

Paul Treguer

Les hommes vivent à la surface de la Terre, y développent leurs activités industrielles et agricoles, et la polluent. C'est pourquoi l'enjeu majeur des recherches sur les enveloppes superficielles de la planète est de fournir aux acteurs politiques et socio-économiques les bases scientifiques d'aide à la décision dans les grands problèmes d'environnement (climat, protection de l'air, de l'eau, de la chaîne alimentaire par l'intermédiaire de l'océan et des sols), de matières premières minérales et énergétiques, de risques naturels, (hydrométéorologiques, géomorphologiques), et ce dans une perspective de développement durable à l'échelle de toute la planète pour les prochaines décennies. Pour l'étude de ces phénomènes, la communauté scientifique utilise des méthodes, des outils, des modes de pensée qui lui sont depuis longtemps naturels et qui vont de l'approche locale ou microscopique à l'approche globale.

Lors de sa session d'Automne 1995, la section 12 a identifié cinq champs thématiques qui lui sont propres : **dynamique de l'océan et de l'atmosphère, climat, chimie de l'atmosphère, biogéochimie et océanographie biologique, formations superficielles et eaux continentales**. Ces différents domaines sont abordés au moyen d'observations, d'études de processus et de travaux de modélisation, ce dernier volet rejoignant

un des enjeux thématiques de la section 13. La section 12 a par ailleurs proposé aux autres sections concernées (11, 13, 31) de retenir la **géomorphologie** comme thème transversal, ce qui a été accepté. Ce thème sera traité ici pour ce qui relève spécifiquement de la section 12.

Les grandes orientations thématiques présentées dans ce rapport ont fait en grande partie l'objet de deux récents colloques de prospective de l'INSU (Colloque de Prospective de la Commission Spécialisée Océan-Atmosphère, Hourtin, 29 septembre -1^{er} octobre 1993 et Colloque de Prospective de la Commission Spécialisée des Sciences de la Terre, Poitiers, 4-5 mars 1996). Ce rapport s'est donc tout naturellement fondé sur les analyses faites lors de ces colloques en insistant sur les développements les plus récents et les domaines à approfondir.

1 - PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE ET ENJEUX

Il y a une vingtaine d'années, les enveloppes fluides de la planète, l'océan, l'atmosphère, les glaces et les formations superficielles terrestres, étaient avant tout considérées comme des milieux qui devaient être étudiés indépendamment les uns des autres à cause des grandes différences entre leurs constantes de temps et les échelles spatiales caractéristiques de leur variabilité. Il est maintenant admis que ces différents milieux forment un seul et même système, extrêmement complexe, soumis au forçage climatique qui est lui-même susceptible de varier à long terme pour des raisons purement astronomiques (variations de l'insolation résultant des changements de l'orbite terrestre, variations de la constante solaire) ou à cause de perturbations internes (tectonique des plaques, croissance ou érosion des chaînes de montagne, volcanisme, variations des cycles biogéochimiques susceptibles d'induire des changements de la concentration des gaz à effet de serre ou de la charge en aérosols de l'atmosphère et des variations de la biosphère continentale, changements de la circulation thermohaline océanique, ...).

Il ne fait nul doute aujourd'hui que le système couplé océan-atmosphère-biosphère terrestre-glace, qui est affecté d'une forte variabilité naturelle, est soumis à des perturbations croissantes dues aux activités humaines : utilisations de l'énergie, agriculture, industrie et activités urbaines. Les émissions d'aérosols et de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, composés azotés, soufrés, fluorocarbonés) modifient le bilan radiatif de la planète. Les rejets de nombreuses espèces chimiques, les produits stockés dans les décharges contrôlées ou non, perturbent non seulement l'environnement local, mais aussi le pouvoir oxydant de la troposphère et de la stratosphère, et notamment la concentration en ozone. L'utilisation de métaux lourds et de certains composés organiques notamment xénobiotiques conduit à une accumulation dans les sols et les eaux de composés toxiques. L'utilisation massive d'engrais relargués en partie dans les fleuves et rivières a pour conséquence l'eutrophisation des eaux continentales et des mers côtières. L'implantation de barrages et les changements d'utilisation des sols (déforestation, mécanisation, urbanisation) influent à la fois sur les bilans hydrique et énergétique régionaux, sur la qualité des eaux et sur l'érosion des sols. Toutes ces agressions convergent vers la mise en péril du plus important patrimoine de l'humanité : l'air, l'eau et les sols.

Les activités humaines modifient ainsi de manière sensible l'environnement régional et global. **Dans une planète dont les ressources énergétiques, en eau et en nourriture sont limitées, avec des altérations de qualité pour ces deux dernières, il devient urgent de diagnostiquer, comprendre et modéliser les évolutions de notre environnement afin d'en prévoir les conséquences à l'échelle régionale et locale et prévenir pour traiter les problèmes à la source.** Ceci constitue un enjeu majeur des recherches abordées par la communauté scientifique internationale dans le domaine des sciences de la planète. Dans ce domaine, une grande partie de l'effort de recherche français s'est progressivement organisée depuis le début des années 80, selon les axes définis au niveau international dans le cadre du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) et du Programme International Géosphère Biosphère (PIGB), tout en tenant compte des spécificités intrinsèques à notre communauté.

Il est essentiel d'insister sur le caractère transdisciplinaire des thèmes d'activités qui concernent l'évolution de l'environnement et du climat, bien qu'ils soient ici présentés séparément. Il est en effet nécessaire de prendre en compte les couplages physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent à la fois dans chaque sous-système et entre les différents sous-systèmes qui composent l'enveloppe fluide de notre planète. Ainsi, le couplage entre la physico-chimie de l'atmosphère, le transfert radiatif et la thermodynamique, et la dynamique de l'atmosphère sont au cœur des études relatives à la caractérisation du climat actuel et de son évolution. Le couplage entre la biologie marine, *via* la capacité de pompage des écosystèmes marins, la turbulence et la dynamique à moyenne échelle de l'océan sont au cœur des études relatives au bilan global du dioxyde de carbone. Le couplage entre la dynamique de la végétation et des écosystèmes terrestres, la turbulence et l'évapotranspiration, les écoulements atmosphériques et hydrologiques au voisinage du sol, et les processus géomorpho-pédogénétiques doivent être pris en compte pour dresser des bilans de l'eau et du carbone.

Cette pluridisciplinarité prend progressivement un caractère "global", par exemple la modélisation couplée océan-atmosphère en cours de finalisation en France. Cette démarche fédérative et intégratrice sous-tendra l'effort de recherche à venir et l'évolution de son cadre programmatique.

2 - DYNAMIQUE DE LA PRODUCTION DES CONNAISSANCES

2.1 DYNAMIQUE DE L'OCÉAN ET DE L'ATMOSPHERE

Ce thème concerne l'étude des processus physiques et dynamiques qui conditionnent l'écoulement de ces deux géofluides, composantes essentielles de notre proche environnement. Les

recherches s'appuient en partie sur des connaissances fondamentales de mécanique des fluides et constituent le maillon indispensable pour comprendre et prévoir les changements climatiques majeurs de notre planète.

La principale caractéristique de cette discipline est l'existence d'une très forte **coopération internationale**, liée au fait que les campagnes d'observation ont lieu dans l'ensemble des océans et en tout point de notre atmosphère. Une deuxième caractéristique est sa position amont par rapport à des importantes **applications opérationnelles** (prévision du temps, de l'état de la mer, ...).

Dans ce domaine très actif, on peut rappeler quelques avancées les plus significatives de ces dernières années :

- une meilleure connaissance des processus majeurs agissant sur la dynamique de l'atmosphère (les écoulements orographiques et leurs conséquences à l'échelle locale et globale ; la dynamique des systèmes nuageux stratiformes ; la convection tropicale développée...)

- la mise en cause de l'approche norvégienne du front polaire, remplacée par un nouveau schéma où l'origine des tempêtes s'expliquerait par la présence de tourbillons précurseurs en altitude ;

- une meilleure connaissance, grâce à des nouvelles observations, des mécanismes et des flux à l'interface océan-atmosphère ;

- la mise en évidence du rôle essentiel des mécanismes de moyenne échelle (tourbillons, convection hivernale, topographie, ...) dans la circulation océanique ;

- la représentation du couplage océan-glace-atmosphère ;

- une meilleure connaissance des facteurs déterminant la circulation des océans sur le plateau continental et sur les zones côtières.

A partir de ces avancées récentes, on peut imaginer les thématiques émergentes ces prochaines années :

- en **océanographie dynamique à méso-échelle**, l'effort principal portera sur : i) la dynamique des structures telles que tourbillons et lentilles d'eau méditerranéennes, les mécanismes de mélange, la convection profonde et les processus associés (effets de la topographie) ; ii) la circulation côtière et son interaction avec la circulation générale ainsi que le couplage hydrodynamique/flux sédimentaires/évolution du trait de côte. Ces études sont indispensables pour progresser dans notre compréhension du milieu, même dans le contexte actuel d'une océanographie se tournant vers l'étude des variabilités interannuelles à décennales (programme scientifique CLIVAR) et d'une océanographie à caractère opérationnel (projet ARAGO/MERCATOR).

- en **dynamique de l'atmosphère**, l'accent sera principalement mis sur : i) l'étude des événements extrêmes, mal prévus actuellement et qui conduisent très souvent à des situations jugées catastrophiques pour l'homme (formation des précipitations intenses, tempêtes sur les latitudes moyennes, convection profonde, ...) ; ii) le rôle des systèmes nuageux et des précipitations, leurs interactions fortes avec la circulation atmosphérique et leur représentation dans les modèles numériques ; iii) l'étude de la dynamique de la stratosphère, en particulier l'approche couplée grande échelle-ondes et les échanges troposphère-stratosphère.

2. 2 CLIMAT

Au cours des quinze dernières années, la compréhension du comportement du système climatique et des mécanismes entrant en jeu a fait l'objet de progrès considérables puisqu'il est maintenant envisageable d'élaborer des modèles raisonnablement fiables, susceptibles de simuler les interactions du système océan-atmosphère-glace en tenant compte directement de leur couplage. Ces modèles permettront de simuler la réponse du système climatique aux perturbations auxquelles il est soumis, en tenant compte du régime transitoire imposé par le développement des activités humaines. Ils devront être testés et améliorés de manière continue par rapport aux longues séries d'observations disponibles recueillies par les ser-

vices météorologiques. Cependant celles-ci constituent une base insuffisante, et elles devront être étendues vers les périodes antérieures aux observations instrumentales par de longues séries paléoclimatiques qui seules permettent d'explorer la totalité de la variabilité climatique et, dans le futur, par les données des services d'observation mis en place dans le cadre du système mondial d'observation du climat.

Tous les mécanismes responsables du changement climatique ne sont pas encore compris. Ceci est vrai des variations dont la paléoclimatologie nous a donné plusieurs exemples, mais aussi de phénomènes d'observation courante tels que le cycle hydrologique ou l'El Niño. Des expériences plus limitées devront être réalisées pour comprendre certains aspects spécifiques du système climatique, et notamment le cycle de l'eau et le rôle de l'océan dans le bilan énergétique global. Pour les années à venir, les axes prioritaires suivants seront plus spécifiquement développés en France :

Paléoclimatologie

L'objectif est d'obtenir des séries paléoclimatiques continentales, océaniques et glaciaires qui devront être analysées à très haute résolution temporelle (quelques centaines d'années pour les 250 000 dernières années qui représentent les deux derniers cycles climatiques, et l'année pour les derniers millénaires). L'enjeu essentiel est la reconstitution des principaux paramètres physiques, chimiques et biologiques (transfert de chaleur, CO₂, productivité biologique terrestre et marine, ...) qui permettront de contraindre les expériences liées au développement d'un modèle couplé atmosphère-glace-océan capable de simuler les climats différents de l'actuel, et leurs variations rapides. Une attention particulière sera portée à la mesure et à l'interprétation des variations climatiques rapides (à l'échelle d'une vie humaine) détectées dans les forages effectués dans les glaces du Groenland ainsi que dans les sédiments de l'Atlantique Nord.

Cycle du CO₂

Pour toute prévision de l'évolution future du CO₂ dans l'atmosphère, il est indispensable de mieux connaître les flux échangés avec les deux

grands réservoirs que sont l'océan et la biosphère continentale. Ceci impliquera :

- de poursuivre l'effort d'acquisition de données expérimentales dans l'atmosphère et l'océan. La France participe à l'effort international dans des sites ou des régions qui constituent des observatoires permanents (les stations Mace Head en Irlande et l'Île d'Amsterdam dans l'océan Indien austral pour l'atmosphère ; l'océan Indien sud-ouest et le Pacifique tropical pour l'océan) ;

- d'orienter les développements en modélisation pour exploiter au mieux les séries d'observation afin de documenter à l'échelle interannuelle les échanges de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan ;

- pour la biosphère continentale, de quantifier et de simuler a) l'effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique et des changements climatiques sur les processus de production et de décomposition de la matière organique et b) les flux échangés avec l'atmosphère en poursuivant l'approche diagnostique qui s'appuie sur l'utilisation de données satellitaires (couvert végétal, production primaire) et en développant l'approche pronostique à partir de modèles mécanistes du fonctionnement de la végétation et de l'évolution des stocks de carbone organique des sols.

Cycle global de l'eau et de l'énergie

L'effort international (programme GEWEX) est structuré autour de deux thèmes principaux : les interactions nuages-rayonnement et l'hydrologie continentale. Les recherches françaises sont orientées aujourd'hui vers trois points focaux :

- l'analyse de l'albédo des nuages, propriété radiative sur laquelle les modèles actuels s'accordent le moins ;

- le bilan radiatif et l'effet de serre : les observations satellitaires et les simulations de la circulation générale atmosphérique seront utilisées conjointement pour comprendre les mécanismes responsables à grande échelle du bilan radiatif de la planète ;

- l'hydrologie continentale : le bassin du

Rhône sera un site sur lequel des expériences de couplage entre un modèle hydrologique et un modèle atmosphérique seront développées, en raison du grand nombre de données disponibles.

Circulation océanique globale

Un effort sans précédent a été réalisé dans le cadre du programme international WOCE afin d'établir la base de données décrivant la circulation océanique globale actuelle ; celle-ci est nécessaire à la modélisation et l'interprétation des fluctuations du climat à l'échelle de quelques décennies. Au niveau français, la partie expérimentale centrée sur l'étude de l'Atlantique Sud et de l'Océan Indien Ouest s'achèvera en 1997.

Un nouveau projet ambitieux (CLIPPER) vise à une modélisation de l'Atlantique à haute résolution, pour résoudre les processus de méso-échelle et étudier le rôle des structures de moyenne échelle sur la circulation générale et les transports associés de masse et de chaleur. L'exploitation de ce modèle en modes forcé et couplé sera un pas décisif vers la modélisation climatique et la mise au point des paramétrisations réalistes nécessaires.

Prévision climatique

L'année 1995 a vu l'achèvement du programme international TOGA dont l'objectif était de démontrer la faisabilité de la prévision climatique en régions intertropicales et de mettre en place les moyens d'observation et de modélisation nécessaires. Des résultats positifs ont été obtenus dans l'Océan Pacifique : modèles de prédiction et analyse d'observations ont permis de prévoir l'épisode ENSO (El Niño/Southern Oscillation) de 1992 un an en avance. Néanmoins le but fixé n'a pas été complètement atteint, puisque l'El Niño 1993 n'a pu être prévu, et il est nécessaire de pousser plus à fond l'étude des mécanismes à l'origine des variations climatiques saisonnières et interannuelles, en mettant à profit les réseaux d'observation déjà mis en place pour valider les modèles. Ceci fait partie des enjeux du futur programme CLIVAR.

Les modèles de circulation générale atmosphérique utilisés jusqu'à maintenant pour la modélisation du climat avaient une résolution trop lâche

pour étudier de façon fine les climats régionaux et leur variation. Les techniques d'étirement de coordonnées, développées sur les deux modèles français, permettent désormais d'affiner la représentation des circulations régionales tout en conservant le cadre global.

Vers une océanographie physique de surveillance et pré-opérationnelle ?

Dans le cadre de CLIVAR, il va s'agir désormais d'étudier les variations temporelles du milieu océanique sur des échelles de temps de l'ordre de dix ans et plus, ce qui impliquera le développement d'instrumentations adaptées, la maintenance de réseaux, la transmission et l'exploitation des données satellitales (altimétrie, diffusiométrie). Parallèlement émerge le concept d'une océanographie opérationnelle (Global Ocean Observing System : GOOS). Un projet national est en cours d'élaboration. La communauté scientifique doit contribuer à sa définition : elle pourra y trouver en retour sur le long terme une aide à la réalisation de ses propres objectifs comme cela est le cas en météorologie. Dans cette perspective, le projet MERCATOR a pour ambition de développer un modèle d'océan global, à haute résolution, ayant la capacité d'assimiler les données satellitales et *in situ*, dans un mode pré-opérationnel à échéance de cinq ans, avec la vocation de devenir opérationnel à plus long terme.

2. 3 CHIMIE DE L'ATMOSPHÈRE

Cinq thèmes principaux, correspondant à des préoccupations environnementales majeures (santé humaine, effet sur la végétation, effet de serre additionnel), rassemblent les études de physico-chimie atmosphérique :

- la mise en évidence des changements de composition de l'atmosphère,
- l'analyse du rôle des émissions naturelles et anthropiques,
- l'ozone stratosphérique,
- la capacité oxydante de l'atmosphère,
- les aérosols et les nuages.

Si les vingt dernières années ont vu un développement marqué de la chimie de l'atmosphère, celui-ci s'est effectué de façon chaotique en réponse à des situations de crise (problèmes de l'ozone, du CO₂, des pluies acides). Les études et les avancées scientifiques ont en premier concerné le milieu stratosphérique, où les échelles de temps et d'espace caractéristiques de la variabilité des phénomènes sont nettement plus grandes que dans la troposphère, système plus complexe en interaction directe avec la biosphère et les sources anthropiques.

Stratosphère

Ces dernières années, la communauté scientifique internationale et française s'est préoccupée de manière prioritaire des processus physiques et chimiques qui déterminent le comportement de l'ozone stratosphérique dans les régions polaires. Grâce aux mesures systématiques effectuées depuis maintenant une quinzaine d'années, les éléments essentiels de la destruction de l'ozone au-dessus du continent Antarctique semblent bien identifiés (activation des radicaux chlorés par conversion hétérogène sur les nuages stratosphériques polaires, cycles de réactions catalytiques en présence de soleil, interruption par recombinaison avec les oxydes d'azote). Cependant, plusieurs questions subsistent :

- Pourquoi la dimension du "trou d'ozone" varie-t-elle d'une année sur l'autre ?
- Quel est l'effet des éruptions volcaniques ?
- Le vortex polaire est-il "imperméable" à tout échange horizontal ?
- Quelle est l'importance de la descente d'air à l'intérieur du vortex ?
- Quelle est la nature physico-chimique exacte des particules au sein des nuages stratosphériques polaires ?
- Quelle est l'importance de la dilution des masses d'air pauvres en ozone, après la rupture du vortex polaire ?

L'activité scientifique s'est récemment amplifiée en Arctique où des processus analogues, mais sans doute plus complexes que dans l'Antarctique, se produisent. La destruction d'ozone aux hautes

latitudes de l'hémisphère nord est moins efficace que dans l'hémisphère sud parce que l'intensité des ondes planétaires y est plus élevée, ce qui conduit à un vortex beaucoup moins stable et à des températures polaires plus élevées. Néanmoins, on assiste ces dernières années à un accroissement de la destruction de l'ozone au-dessus de l'Arctique lié à une certaine stabilisation du vortex polaire. Les questions à résoudre sont les mêmes qu'en Antarctique, souvent plus complexes, en particulier pour les processus dynamiques et leur rôle à petite échelle dans la destruction de l'ozone par le chlore "actif".

Aux moyennes latitudes, des mesures par satellites ont montré que, ces dernières années, l'ozone a fortement décru, de façon imprévue, dans la partie inférieure de la stratosphère. Des études portant sur des espèces minoritaires en relation avec l'ozone ont souligné le rôle des réactions hétérogènes sur des aérosols tels que les sulfates et les suies.

Dans les années à venir, l'orientation des recherches portera prioritairement sur :

- l'étude des processus microphysiques et leur importance pour la chimie des aérosols,
- le rôle du brome dans la stratosphère inférieure,
- la quantification des échanges de masse entre la stratosphère et la troposphère, en particulier le rôle joué par la convection tropicale dans la redistribution des espèces minoritaires vers la basse stratosphère,
- l'impact futur des perturbations anthropiques et, plus particulièrement, celui d'une flotte potentielle d'avions supersoniques volant vers 15-20 km d'altitude.

Troposphère

L'évolution de l'ozone troposphérique retient également l'attention de la société et de la communauté scientifique. L'apparition de plus en plus fréquente d'épisodes d'ozone dans les grandes villes européennes et américaines, malgré les mesures antipollution qui ont été mises en place, nécessite de mieux comprendre les mécanismes de dégradation des hydrocarbures et le rôle des composés azotés dans les régions polluées. L'existence d'autres émissions anthropiques (combustion de la bio-

masse végétale, en particulier en régions tropicales) et naturelles (par exemple l'isoprène des forêts) doit également être prise en compte.

Une question majeure est celle de l'existence de tendances à long terme dans l'évolution de l'ozone troposphérique. C'est un problème important parce que ce corps contribue à l'effet de serre et détermine dans une large mesure le pouvoir oxydant de l'atmosphère. Ceci implique :

- de déterminer si les oxydes d'azote émis par la flotte actuelle et future d'avions subsoniques sont susceptibles de perturber de manière significative l'ozone de la troposphère supérieure, ce qui nécessite de connaître l'intensité des sources naturelles, en particulier la quantité d'oxydes d'azote produites par les éclairs dans les orages. Cette production devra d'abord être estimée à l'échelle du nuage, avant d'être quantifiée à l'échelle globale ;

- de continuer à observer l'évolution de l'ozone troposphérique et ses précurseurs. A cet égard, l'expérience MOZAIC à bord d'avions de ligne instrumentés est très instructive mais insuffisante, ce qui implique que des moyens supplémentaires soient mis en œuvre pour obtenir une climatologie à l'échelle globale.

Interactions chimie-climat

Un autre enjeu majeur est celui de l'impact des processus physico-chimiques atmosphériques sur le forçage radiatif. Il n'est plus possible aujourd'hui de considérer que l'effet anthropique sur le climat résulte du seul accroissement de CO₂. Il faut tenir compte des effets supplémentaires des autres gaz à effet de serre, principalement le méthane, l'oxyde nitreux, et l'ozone, et de ceux encore mal connus des aérosols naturels et anthropiques (sulfates, aérosols carbonés, poussières désertiques) dont le rôle, récemment mis en évidence en tant que rétroaction à l'échelle régionale et continentale, doit être précisé.

Enfin, les interactions entre l'atmosphère et la biosphère (terrestre et marine) doivent être mieux paramétrées pour pouvoir être prises en compte dans les modèles d'évolution du climat.

2. 4 BIOGÉOCHIMIE ET OCÉANOGRAPHIE BIOLOGIQUE

Les modifications ou perturbations anthropiques des cycles biogéochimiques naturels se produisent à toutes les échelles, depuis le niveau **local** (une lagune, une baie, un estuaire), jusqu'au **niveau global** (la "planète bleue" dans son ensemble). En conséquence, l'objectif ultime des recherches est de décrire, comprendre et modéliser les cycles biologiques et géochimiques du carbone et des éléments associés et leurs perturbations. Ceci implique la quantification des flux de matière dissoute et particulaire transportés dans l'océan et échangés entre les différents compartiments et aux interfaces continent-océan, atmosphère-océan, sédiment-océan, ainsi que la paramétrisation des processus physiques, chimiques et biologiques de transformation de la matière et la détermination des échelles de temps associées. Un autre sujet important, à l'interface des domaines thématiques des sections 12 et 30, est celui des relations entre biodiversité marine, fonctionnement des écosystèmes et changements climatiques globaux.

L'échelle planétaire

À l'échelle globale, la principale question concerne le rôle de l'océan dans la régulation du climat, et plus précisément comment les processus biologiques interviennent dans cette régulation par le mécanisme de la pompe biologique du carbone et des éléments associés : azote, silice et phosphore. Deux grands régimes caractérisent les flux de matière dans les systèmes marins. En régime de production nouvelle (origine allochtone des nutriments), les systèmes sont exportateurs de carbone et de matières biogéniques associées qui parviennent jusqu'aux sédiments. En revanche, le recyclage de matière dans la couche euphotique est intense en régime de production régénérée (origine autochtone des nutriments).

Le fonctionnement des **systèmes oligotrophes**, longtemps considérés comme des régimes de production régénérée, n'est pas encore élucidé. En particulier, le rôle du picophytoplancton demeure très imparfaitement connu, tant du point de vue de sa biodiversité que de son impor-

tance dans la production totale et la production exportable des écosystèmes. La connaissance du picophytoplancton, déjà très tributaire du progrès technologique (cytométrie en flux et analyse pigmentaire), apparaît, pour le futur, liée au développement des méthodes de la biologie moléculaire.

Une autre question majeure est celle de la compréhension du fonctionnement des **systèmes HNLC** (High Nutrient, Low Chlorophyll) qui occupent plus du tiers de l'océan mondial (Pacifique Nord, zones équatoriales, Océan Austral). Leur production photosynthétique (notamment due aux organismes siliceux) est loin d'être à la hauteur des réserves en sels nutritifs de la couche de surface, alimentée par des divergences océaniques. Parmi les facteurs qui limitent cette production et la pompe biologique du carbone, le rôle joué par les métaux traces, dont le fer d'origine éolienne, pourrait être déterminant, ce qui impliquerait que de tels systèmes soient particulièrement dépendants des variations climatiques à grande échelle.

Une avancée significative concerne la prise en compte du **compartiment organique dissous** désormais intégré dans les estimations de production et de séquestration par l'océan de carbone organique. Des nouvelles techniques (marquage isotopique) permettent de quantifier la production d'azote organique sous forme dissoute. Il est maintenant nécessaire d'effectuer le même progrès méthodologique avec le carbone.

Les flux de matière organique particulaire quittant la zone euphotique sont à juste titre considérés comme les principaux responsables de la pompe biologique du carbone. Cependant, de très grandes incertitudes subsistent quant aux valeurs des flux respectivement estimés par les pièges à particules et les traceurs, ce qui impliquera pour les réduire :

- des études de la cinétique de dégradation de la matière organique particulaire, en particulier sous l'action bactérienne,

- la quantification des flux et des processus d'échanges de matière entre phase dissoute et particulaire (absorption-désorption) ainsi que les échelles de temps associées,

- l'évaluation du rôle joué par le transport actif de matière induit par les migrations verticales du **zooplancton**. On suppose généralement que les mécanismes de décomposition dominent l'évolution de la matière particulaire qui sédimente. En fait, de nombreuses explorations **par submersibles habités** ont montré une structure verticale importante des biomasses et une faune inconnue dans les grandes profondeurs. Aussi est-il important de chercher à comprendre les phénomènes qui s'y déroulent, aussi bien du point de vue macrobien que microbien.

Au niveau de l'interface eau-sédiment, il faut comprendre les mécanismes et quantifier les taux des transformations biogéochimiques dans le but d'obtenir des paléo-marqueurs plus fiables de la productivité et de la dynamique de la circulation thermohaline ; ceci nécessitera de développer la modélisation des flux de matière en condition non-stationnaire.

Le domaine côtier

Parmi les faits qui ont marqué la recherche océanographique au cours de ces dernières années, il faut noter la montée en puissance de l'océanographie côtière, parce que c'est une zone d'échanges privilégiée – seul point de contact entre les trois grands systèmes de la planète (océan-continent-atmosphère) –, ainsi qu'un domaine soumis aux activités humaines. Son importance économique justifie une recherche finalisée vers la gestion de la ressource et de l'environnement, associée au concept de développement durable.

En raison des apports continentaux et d'une productivité biologique élevée, le domaine côtier est soupçonné de jouer un rôle important dans le cycle global du carbone dans les océans. Source pour l'océan profond si une partie significative de la matière organique non consommée sur place était exportée vers le pente continentale ; à l'inverse, puits si une fraction importante du surplus de matière organique était piégée dans les sédiments. Cette controverse implique clairement la nécessité d'évaluer les apports continentaux et atmosphériques, leur transport physique, les transformations subies dans le milieu, leur piégeage dans le sédiment et les échanges avec le large.

Le "vivant", en transférant et en transformant la matière, occupe une place clé dans la régulation des processus côtiers. Concernant la place de la biologie dans ce thème, deux points semblent émerger ces dernières années :

- **La notion de réseau trophique**, en tant que participation du "vivant" dans les flux. Le manque de connaissances au niveau des réseaux microbien, benthique et planctonique implique : i) l'étude des métabolismes bactériens dans ces systèmes ; ii) la prise en compte des processus de dénitrification, sulfato-réduction, méthanogénèse dans le but d'établir des bilans ; iii) la mise en évidence des interrelations de ces métabolismes avec les apports anthropiques considérés comme source de carbone ou de dysfonctionnement. A l'interface eau-sédiment, le problème principal à résoudre est celui du devenir de la matière organique sédimentée, ce qui nécessite de connaître la consommation de matière par le réseau trophique benthique ainsi que les mécanismes de remise en suspension, d'enfouissement, de bioturbation et de stockage dans le sédiment.

- **L'intérêt croissant de la composante qualitative** vis-à-vis de la composante purement quantitative dans les transferts de matière. Par exemple, les questions relatives au **plancton toxique** dont la fréquence d'apparition, l'extension géographique et l'intensité vont croissants, relèvent clairement de la biologie des espèces, confrontées à des modifications des équilibres nutritifs. On constate une même préoccupation dans l'approche biochimique des processus biologiques qui vise à clarifier l'importance relative des variations qualitatives et quantitatives des apports alimentaires sur la nutrition et la reproduction des organismes pélagiques. Quant à l'étude du déterminisme du recrutement des invertébrés benthiques, jusqu'à présent essentiellement appréhendée par l'analyse des relations interindividuelles et/ou interspécifiques, elle devra prendre en compte les processus physiques (courants, thermocline) qui délimitent la structure spatiale à l'intérieur de laquelle les processus biologiques se déroulent.

2. 5 FORMATIONS SUPERFICIELLES ET EAUX CONTINENTALES

Traditionnellement, la communauté des géosciences de la surface a pris en compte des thématiques relevant de l'étude de l'environnement continental, à savoir :

- la connaissance, la gestion, la protection des eaux continentales et des sols, ainsi que des formations superficielles dans lesquelles les eaux circulent et les sols se développent,

- la protection contre les aléas et risques naturels (hydrométéorologiques : inondations, sécheresse... ; géomorphologiques : érosion amont et sédimentation aval, glissements de terrain...),

- la protection, l'extraction, la valorisation des ressources minérales et énergétiques et le stockage des déchets dans les formations sédimentaires dans des conditions assurant la protection de l'eau et de l'air.

Ces thématiques relèvent de plusieurs disciplines connexes (dynamique de l'atmosphère, hydrologie, géomorphologie, pédologie, sédimentologie, géophysique de surface, pétrophysique, hydrogéochimie, géochimie isotopique, minéralogie, physico-chimie des interfaces et des systèmes sols-solution aqueuse, physiologie et écologie végétale, biologie des sols) dont les interactions se sont progressivement développées de façon à évoluer vers une approche non-compartmentale de phénomènes qu'il est nécessaire d'étudier, de l'échelle nanométrique à l'échelle globale et à tous les incréments de temps, les constantes de temps des processus variant de la seconde au millénaire. Par souci de clarté, parce que les enjeux environnementaux sont différents ainsi que les échelles de temps, on abordera successivement deux sous-systèmes : l'eau et les sols d'une part, les formations superficielles et corps sédimentaires d'autre part.

L'eau et les sols

L'eau et les sols sont certainement les ressources les plus fragiles de la planète et ce, aussi bien du point de vue quantitatif que qualitatif.

L'évolution démographique, l'éventualité de changements climatiques, l'accroissement des pollutions locales ou diffuses, l'occurrence récurrente de phénomènes paroxysmiques (phénomènes érosifs, crues, inondations, mais aussi sécheresses) sont autant de sources de conflits majeurs centrés sur la maîtrise de l'eau et la préservation du capital "sol" qui peuvent durablement marquer les prochaines décennies où l'eau deviendra dans certaines parties du monde l'objet d'enjeux politiques graves. Face à ce risque réel et crucial, il est apparu, ces dernières années, une prise de conscience de plus en plus importante de la nécessité scientifique :

- de développer une **approche intégrée du cycle continental de l'eau** (incluant l'ensemble de ses composantes, notamment biologiques et écotoxicologiques) et **des flux couplés** (énergie, solutes, gaz, sédiments) ;

- de considérer le sol, milieu polyphasique, comme un **réacteur biogéochimique** aux capacités limitées de rétention et de dégradation de substances polluantes, voire toxiques, et comme une interface active avec les eaux souterraines, la biosphère continentale et l'atmosphère ;

- de renforcer les interactions entre **disciplines** scientifiques autour de problématiques et/ou d'objets communs d'étude (ex. les expériences de type HAPEX, les bassins versants de recherche et autres sites/zones ateliers).

Ces tendances "lourdes" que l'on constate au plan international et national se sont traduites concrètement ces deux dernières années par le développement et la structuration de la thématique "hydrologie" ainsi que par une réflexion sur la mise en œuvre d'une problématique "formations superficielles-sol-environnement". Sous-tendus par une demande sociale forte (dynamique du climat ; gestion et sauvegarde des ressources en eau – superficielle, souterraine – en termes de quantité et de qualité ; prévision des risques hydro-météorologiques et de pollutions diffuses et ponctuelles de l'environnement ; études d'impacts et réhabilitation de sites pollués), les objectifs essentiels visent à une meilleure compréhension du fonctionnement du cycle de l'eau sur les surfaces continentales, à différentes échelles spatio-temporelles afin :

- d'étudier la réponse des hydrosystèmes et des sols à une évolution des forçages climatiques et anthropiques (modifications de l'énergie disponible pour l'évapotranspiration, flux de CO₂ et de gaz traces vers l'atmosphère) ;

- de développer des modèles hydrologiques à **base physique**, tenant compte des hétérogénéités spatiales, pouvant être **couplés** à des modèles
 - de circulation atmosphérique (modèles sol-végétation-atmosphère, sub-méso, méso-échelle, circulation générale) (*eau comme ressource*),
 - de production (dans les sols notamment) et de transformations de particules de substances chimiques (*eau comme agent*),
 - de transfert de particules et de substances chimiques associées (*eau comme vecteur*) ;

- de développer et de valider les paramétrisations de l'interface atmosphère-biosphère continentale : la mesure, à toutes les échelles, des flux d'évapotranspiration réelle (associée à la réalisation des bilans d'énergie) reste un défi à relever, avec la caractérisation et la modélisation du fonctionnement de la zone racinaire ;

- de rechercher des relations entre des critères éco-pédologiques, géomorphologiques, géologiques et des paramètres macroscopiques de transfert permettant, à l'aide de systèmes d'informations géographiques, des cartographies dynamiques aboutissant à une quantification régionale des transferts (modèles numériques de terrain).

Pour ce qui concerne le sol, les objectifs majeurs seront :

- de développer l'étude du comportement, de la réactivité et du devenir des polluants organiques et inorganiques dans les sols (métaux, pesticides), depuis l'échelle moléculaire jusqu'à celle du bassin versant. Ces études, nécessairement pluridisciplinaires (science du sol, biochimie, géomicrobiologie, chimie et physico-chimie des interfaces, géochimie, hydrologie), doivent prendre en compte les diverses échelles de temps entrant en jeu et doivent obligatoirement prendre en compte le champ de vitesse. Les équipes françaises ont su dans ce domaine créer une véritable école concernant la caractérisation des propriétés structurales,

texturales, et superficielles de ces matériaux finement divisés, inhomogènes, dont le rôle est primordial avec la matière organique dans l'organisation et l'érodibilité des sols, la rétention de la matière organique et le transport des polluants ;

- de promouvoir les études sur le temps moyen de résidence des matières organiques des sols dans l'optique de préciser leurs fonctions essentielles : source-puits pour le CO₂ atmosphérique et pour l'azote (nutriment mais aussi élément polluant), véhicule de polluants dans et hors du sol, fournisseur d'électrons, intervenant sur la création de sites anoxiques, à l'origine de l'émission de gaz à effet de serre comme N₂O et CH₄ ;

- de considérer les sols, les formations superficielles et les altérations épaisses comme des archives des phénomènes d'altération, régis par les relations avec l'atmosphère et les végétations passées, et ainsi de prendre en compte les signaux paléoclimatiques, paléotectoniques et paléoécologiques qu'ils contiennent et qu'ils peuvent transférer aux formations sédimentaires ;

- de prendre en compte les nouveaux sites "atelier" que sont les sites de stockage des déchets (domestiques, industriels, nucléaires, etc.) dont l'importance et le volume ne feront que croître dans l'avenir. Il s'agit par là de mieux connaître les zones à risque pour protéger la qualité des eaux continentales. Dans ce domaine, les recherches ont déjà débouché sur la mise au point de barrières géochimiques et de produits stabilisés.

Il semble essentiel de renforcer, dans le cadre d'une approche **systémique**, les études portant sur les **couplages** entre :

- le fonctionnement du milieu physique et la biosphère continentale (ensemble des êtres vivants et des sols),

- les différents compartiments : atmosphère/sol/végétation (incluant le rôle des sols dans les grands cycles biogéochimiques) ; sol/aquifère réunis en une préoccupation unique ; sol/nappes/rivières, continent/littoral,

- les processus : hydrodynamique/bio/géo/physico-chimiques, hydro-mécanique, thermo-hydraulique notamment.

Formations superficielles et corps sédimentaires

Les formations superficielles sont le support de l'activité humaine et peuvent être le siège d'évolutions brutales (aléas et risques naturels) dont la société cherche à se protéger. Leur identification et leur caractérisation doit porter sur leur géométrie, leurs conditions de dépôt - responsables essentielles de leur composition et de leurs propriétés chimiques et physiques (statiques et dynamiques) - ainsi sur que leur évolution naturelle (diagénèse) ou contrainte par une activité anthropique directe (exploitation des substances utiles, stockages...) ou indirecte (pollutions). L'analyse de la diagénèse précoce qui conditionne une part notable des propriétés physiques des roches sédimentaires et surtout de leur chimie (matière organique, éléments en trace) doit s'appuyer sur l'étude de milieux et séries (sub-) actuels.

Afin d'éviter une dispersion des moyens et d'assurer une utilisation optimale des données, les études doivent être menées selon une **synergie des approches** géomorphologiques, sédimentologiques, pétrophysiques et biogéochimiques. Les interfaces disciplinaires suivantes sont tout particulièrement à développer :

- géomorphologie et géochimie isotopique (isotopes cosmogéniques...),
- géochimie organique et géochimie minérale,
- stratigraphie séquentielle et géochimie (isotopique, minérale et organique),
- pétrophysique et géochimie. Il faut notamment décrypter **simultanément** la "mémoire physique" et la "mémoire chimique" des paléomilieux dans les enregistrements sédimentaires ; l'étude des structures de porosité des formations superficielles et des roches sédimentaires est un objectif très important dans cette approche.

3 - INSTRUMENTATION/ SIMULATION, OUTILS TECHNOLOGIQUES

Dans l'ensemble, la synergie observation-expérimentation-modélisation a joué et continuera à jouer un rôle majeur dans le développement de ces différents champs thématiques, ceci afin d'acquérir les mesures nécessaires à la description du système océan-atmosphère-biosphère-glace, d'analyser les processus majeurs qui interviennent et les rétroactions qui les lient, et de quantifier leur rôle à l'aide de modèles numériques. Cette démarche a été menée avec succès en France, grâce à une politique volontariste de mise en œuvre au cours de ces dernières années de développements simultanés de nouveaux moyens d'observation et de modèles numériques de plus en plus en plus perfectionnés.

3. 1 LES SYSTÈMES D'OBSERVATION DE L'ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT

En complément des observations systématiques effectuées par les services météorologiques et hydrologiques, plusieurs laboratoires consacrent une partie de leur activités et de leurs moyens à des mesures continues de la composition chimique de l'atmosphère ou de certains paramètres physiques et biogéochimiques de notre environnement. Cette activité dans laquelle les équipes françaises ont souvent joué un rôle de pionnier, est pleinement reconnue au niveau international. Elle devra être renforcée et pérennisée dans les années à venir. Sans être exhaustif, on rappellera ou on citera à titre d'exemple :

- les mesures effectuées à l'Observatoire de Haute-Provence qui ont permis de suivre l'évolution de l'ozone troposphérique et stratosphérique au cours de la dernière décennie et de mettre en évidence un refroidissement significatif de la mésosphère ;
- le suivi à l'Île d'Amsterdam (TAAF) de l'augmentation de la concentration atmosphérique en

CO₂ de l'hémisphère Sud. Plus lente que dans l'hémisphère Nord, elle est la conséquence de la répartition globale des sources et des puits de CO₂ que les modèles biogéochimiques commencent à quantifier ;

- les longues séries d'observations des variations du niveau de la mer réalisées depuis plus d'un siècle (en particulier à Brest) qui ont permis d'estimer à 1,5 mm/an le taux d'élévation du niveau global de l'océan. Des observations de ce type ont débuté dans la zone péri-antarctique de l'Océan Indien pour la validation des données altimétriques TOPEX-POSEIDON ;

- l'évolution à long terme des écosystèmes côtiers en relation avec les modifications hydroclimatiques et anthropiques ;

- le suivi climato-hydrologique, hydrochimique, géomorphologique et écosystémique à long terme d'observatoires de terrain en différents sites continentaux.

La reconstitution de l'évolution à long terme de l'environnement fait appel aux méthodes paléoclimatiques, autre point fort de la communauté nationale. L'analyse des glaces polaires a montré l'ampleur des variations de composition chimique de l'air depuis le début de l'ère industrielle. Sur des périodes plus longues, l'étude des carottes de glace et de sédiments marins a permis de quantifier la variabilité climatique à long terme et de mettre en évidence des variations abruptes, de grande amplitude, parfaitement sensibles à l'échelle d'une vie humaine, illustrant ainsi et permettant d'analyser le comportement non-linéaire du système géosphère-biosphère.

3. 2 LES EXPÉRIENCES INDISPENSABLES AUX ÉTUDES DE PROCESSUS

Des expériences de grande ampleur, pluridisciplinaires, nationales et bien souvent internationales, sont et seront nécessaires pour appréhender simultanément les principaux facteurs physiques,

chimiques et biologiques en interaction dans les différents compartiments du système géosphère-biosphère. Parmi les exemples les plus significatifs, on rappellera :

- les campagnes arctiques européennes (EASOE, SESAME) auxquelles la communauté française a largement participé, qui ont permis de comprendre les mécanismes de destruction de l'ozone stratosphérique et d'expliquer les différences de comportement entre les deux hémisphères ;

- les campagnes troposphériques qui ont permis d'étudier les composés chimiques précurseurs de l'ozone et de fournir un jeu de données permettant de tester les modèles 2-D et 3-D simulant la circulation de l'atmosphère et les réactions chimiques qui s'y déroulent (TROPOZ), et les campagnes DECAFE qui ont permis d'évaluer, à l'échelle du continent africain, l'influence des feux de végétation sur la chimie de l'atmosphère tropicale ;

- les campagnes HAPEX qui ont abouti au développement d'un nouveau schéma de paramétrisation des transferts sol-végétation-atmosphère qui est maintenant opérationnel dans le modèle climatique Arpège ;

- les campagnes de dynamique atmosphérique pour l'étude des processus liés aux écoulements orographiques (PYREX), au couplage des couches limites de l'océan et de l'atmosphère (SOFIA/ASTEX, SEMAPHORE) et à la convection tropicale et l'interaction océan-atmosphère (TOGA-COARE) ;

- les campagnes d'étude des nuages (ICE, SOFIA/ASTEX, EUCREX) qui ont permis de mieux comprendre l'influence des hétérogénéités sur les propriétés optiques et sur la dynamique des nuages, de caractériser les propriétés microphysiques des cirrus et de tester de nouvelles méthodes de télédétection des nuages ;

- la participation aux expériences TOGA qui a permis d'acquérir un jeu de données unique, qui a été utilisé pour simuler le couplage entre l'océan Pacifique et l'atmosphère sur une période de dix ans, et au programme WOCE qui a permis de réaliser une exploration globale et systématique de la

structure 3D de l'océan avec une densité de points de mesure exceptionnelle ;

- les campagnes océaniques en région sub-polaire qui ont permis de mieux comprendre la convection profonde, mécanisme fondamental de la circulation océanique ;

- les campagnes de biogéochimie marine (JGOFS) qui ont permis de quantifier et de modéliser les flux de CO₂ à l'interface atmosphère-océan, d'élucider les mécanismes de production, de consommation et de recyclage du carbone, d'azote et de silicium, et de déterminer les flux de production exportée de la couche euphotique et l'accumulation à long terme de matière organique dans les sédiments ;

- les études de processus et expérimentations menées dans les laboratoires de terrain qui constituent les bassins versants de recherche et autres sites ateliers hydrologiques et géomorphologiques (glissements de terrain, érosion...).

3. 3 LES DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX

L'introduction d'instruments nouveaux, parfois développés pour d'autres applications scientifiques, a permis des progrès considérables dans l'étude des systèmes naturels. On peut citer, parmi ceux qui ont eu un effet important :

- Le développement des méthodes de télédétection active pour l'étude des variables physiques et de la composition chimique de l'atmosphère. Les nouveaux systèmes de radars Doppler ont permis, pour la première fois, de documenter la dynamique globale de systèmes convectifs. L'arrivée du nouveau radar franco-américain ASTRAIA est un atout décisif dans les futurs programmes d'observation à moyenne échelle de la circulation tridimensionnelle des systèmes nuageux. Les radars stratosphère-troposphère, organisés en réseau national sont des outils privilégiés pour la quantification dynamique des échanges entre ces deux compartiments. Les lidars embarqués sur avion contribuent de façon déterminante à la connaissance des processus

d'échange dans la couche limite, et des structures nuageuses.

- Les développements instrumentaux destinés aux études de chimie atmosphérique, qu'il s'agisse de mesures au laboratoire ou sur le terrain. On citera en particulier l'effort fait pour la mesure *in situ* à partir de plates-formes d'observation (avions instrumentés, ballons stratosphériques, satellites).

- En océanographie biogéochimique, l'effort important qui a été initié pour le développement de systèmes de mesure automatique, et, *in situ*, profilers verticaux autonomes ou non, chambres et modules benthiques, bouées autonomes de mesures de CO₂. L'utilisation intensive de pièges à particules a permis de mettre en évidence la forte variabilité temporelle des flux de carbone particulière exporté vers les eaux profondes. La technique de cytométrie de flux s'est révélée un progrès majeur en permettant de caractériser les différentes communautés constituant le picophytoplancton. Pour les prochaines années, l'utilisation des méthodes de biologie moléculaire est susceptible de permettre la caractérisation de l'appareil photosynthétique des procaryotes marins, la détection des bactéries et du picophytoplancton et la quantification de la fixation de l'azote par des cyanobactéries unicellulaires.

- En océanographie physique, les efforts qui portent sur le développement de systèmes de mesure s'appuyant sur des techniques autonomes et automatiques. C'est ainsi que le flotteur MARVOR, développé et testé dans le cadre du programme WOCE, permet à la fois de suivre les courants profonds et de mesurer les températures le long de ses trajectoires. D'autres outils sont en cours d'étude, soit sur ce principe de bouées dérivantes, soit sur des systèmes mouillés fixes (profilers YOYO, stations bathysondes EMMA, ...).

- L'étude des formations superficielles et des eaux continentales qui fait de plus en plus appel à des méthodes intégratrices telles que la télédétection (cartographie et suivi temporel des paramètres et flux de surface), la géophysique superficielle (géo-radar, méthodes électriques et électromagnétiques), et l'utilisation de multi-traceurs environnementaux (origine spatiale et temps de résidence des

eaux et des sédiments). Il apparaît en particulier nécessaire de satisfaire les besoins lourds : i) en analyses organiques par couplage pyrolyse-GC-MS permettant à la fois l'analyse qualitative et quantitative de la matière organique dissoute et particulaire ainsi que les matériaux organo-minéraux ; ii) en microanalyse de surface (XPS, effet Auger) permettant la connaissance de la spéciation des phases superficielles, leur hétérogénéité tant latérale que normale.

- Le développement des moyens de télédétection spatiale grâce au lancement de nouveaux satellites instrumentaux dédiés à l'observation de la Terre ou à l'implantation de nouveaux instruments spécifiques. En France, l'action du CNES a été déterminante dans ce domaine. Ainsi l'altimétrie satellitaire se révèle actuellement, en particulier avec la mission franco-américaine TOPEX/POSEIDON, comme un outil irremplaçable en océanographie dynamique, permettant la cartographie centimétrique des marées océaniques, celle de l'énergie turbulente des courants, les premières mesures des fluctuations sub-saisonniers de l'océan en réponse aux fluctuations du vent, les premières descriptions globales des variations saisonnières et interannuelles de la position et des transports des grands courants océaniques, les premières mesures de la répartition du stockage thermique saisonnier dans l'océan de surface, les premières cartes de la dérive interannuelle du niveau de la mer, ... Outre TOPEX/POSEIDON, on peut citer i) l'expérience SCARAB (SCanner for the RAdiation Budget) réalisée dans le cadre d'une coopération franco-germano-russe et qui permet l'observation du bilan radiatif de la Terre, de sa variabilité et de sa modulation par les nuages ; ii) le projet POLDER (POLarization and Directionality of Earth Reflectances) lancé à l'automne 96 dans le cadre d'une coopération franco-japonaise. POLDER est le premier instrument spatial permettant la mesure de la polarisation et de la distribution angulaire du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la surface. Les applications concernent l'étude des aérosols, de la couleur de l'eau et des nuages. On rappellera aussi que les mesures satellitaires ont maintenant démontré la faisabilité d'obtention de cartes globales de productivité terrestre et marine et de caractéristiques des sols.

Enfin, on rappellera que l'accès aux navires océanographiques hauturiers et côtiers et aux moyens aéroportés (ballons stratosphériques, avions instrumentés) est une priorité indispensable pour le développement des sciences de l'océan et de l'atmosphère. Dans ce contexte, on mentionnera les renouvellements récents de la flotte océanographique française (Atalante, Marion Dufresne 2, Théthys) ainsi que les projets européens d'une plate-forme d'observation aéroportée à long rayon d'action (C130, Airbus) et d'un navire de forage (NEREIS). A l'horizon 2000, le remplacement des avions de recherches atmosphériques et de télédétection est une priorité très forte de la communauté scientifique nationale.

3. 4 LA MODÉLISATION

Outil intégrateur par excellence, elle est de plus en plus indispensable pour simuler le système géosphère-biosphère aux échelles régionales et globales et pour fixer les stratégies d'observation des campagnes expérimentales. La communauté est jeune et bien insérée dans les programmes internationaux. Parmi quelques acquis importants ces dernières années, on peut rappeler ou citer :

- le couplage des modèles d'atmosphère globale avec un modèle d'océan équatorial pour simuler le développement de l'El Niño,

- le développement d'un modèle de prédiction des marées océaniques à l'échelle mondiale à la précision de quelques centimètres,

- la simulation de la dynamique et de la thermodynamique des couches de surface de l'Atlantique Équatorial,

- le développement d'un modèle global à basse résolution de la circulation générale de l'océan,

- la simulation à haute résolution des circulations dans des bassins (Atlantique Sud, Méditerranée)

- l'utilisation des techniques d'assimilation de données *in situ* (en particulier altimétriques) dans des modèles numériques de simulation océanique,

- l'utilisation de la modélisation du système climatique global (océan-atmosphère-glace couplés) pour montrer la similitude des réponses du climat à des variations de l'irradiance solaire et à des variations des quantités de gaz à effet de serre,

- la simulation de processus fondamentaux à moyenne échelle dans l'atmosphère, tels les écoulements orographiques, la turbulence, les interactions sol-atmosphère, et les bandes de précipitation dans les systèmes convectifs et frontaux,

- la modélisation couplée de la dynamique et de la physico-chimie stratosphérique pour simuler l'évolution du trou d'ozone,

- le développement de la modélisation des processus chimiques dans la troposphère.

- la modélisation couplée hydrodynamique-énergétique dans le système sol-végétation-atmosphère, ou hydrodynamique-géochimique dans les nappes.

Le développement des grands moyens de calcul, en particulier le passage au calcul massivement parallèle, constitue un des grands enjeux de l'ensemble de la discipline notamment en modélisation numérique de l'atmosphère et de l'océan. Il va permettre de développer des thématiques plus activement interdisciplinaires que par le passé dans la mesure où il sera possible de simuler les processus contrôlant le système climatique et les couplages océan-atmosphère-glace, sous leurs aspects physiques, chimiques et biologiques. Le développement de méthodes d'assimilation des données d'observation systématiques, en particulier les données satellitaires, constitue dans ce contexte une approche d'une importance majeure. On peut envisager pour les prochaines années des progrès importants dans les domaines suivants :

La modélisation globale du système couplé océan-glace-atmosphère

La communauté nationale dispose maintenant de deux modèles d'atmosphère couplés à un

modèle unique d'océan. Les simulations faites sont de qualité. L'introduction d'un modèle de glace de mer incluant les modules thermodynamiques et dynamiques (en cours de réalisation) permettra de disposer d'un outil performant pour analyser et projeter les variations naturelles ou anthropiques à l'échelle de quelques décennies.

Les modèles atmosphériques

Ceux-ci comportent maintenant des modules décrivant l'interaction sol-végétation atmosphère et une représentation de plus en plus détaillée des systèmes nuageux. Dans les prochaines années, la communauté scientifique pourra exploiter un nouveau code méso-échelle non-hydrostatique qui offre un gamme très étendue de domaines d'application.

La modélisation de la circulation océanique.

Elle est promise à un développement rapide, d'une part en raison de la possibilité offerte désormais par la puissance des ordinateurs de résoudre explicitement la turbulence de méso-échelle, et, d'autre part, en raison de l'arrivée croissante des données satellitaires, d'altimétrie et de diffusiométrie principalement, dont l'assimilation doit permettre une amélioration considérable du réalisme des simulations numériques.

La modélisation couplée physique-chimie-biologie

La prise de conscience de l'importance du couplage entre les processus dynamiques, chimiques et biologiques nécessitera l'apprentissage d'approches nouvelles en modélisation à micro-échelle, méso-échelle et grande échelle dans l'océan, l'atmosphère, à l'interface sol-végétation-atmosphère et dans les formations superficielles (techniques d'emboîtement de modèles d'emprises différentes, développement d'outils d'assimilation de données). Les principaux domaines concernés sont :

- la chimie troposphérique et stratosphérique, où les phénomènes de mélange et de transport conditionnent la répartition des espèces chimiques

(ozone, oxydes d'azote, hydrocarbures, gaz à effet de serre...),

- la dispersion des polluants dans l'océan, l'atmosphère, les sols et les eaux terrestres,

- la production biologique dans l'océan. A titre d'exemple, en zone côtière il faut développer un outil numérique 3-D à maillage fin capable de reproduire la croissance et l'évolution de la biomasse phytoplanctonique sous l'influence des forçages physiques (vents, crues...),

- le cycle du carbone et de l'azote à la fois dans l'atmosphère, l'océan et la biosphère continentale,

- l'évolution morphogénétique des formations superficielles à l'échelle du versant et celle du relief à l'échelle des paysages,

- l'évolution des milieux et formations sédimentaires tant à l'échelle de la porosité des roches qu'à celle du bassin.

4 - INTERDISCIPLINARITÉ ET ORGANISATION DE LA COMMUNAUTÉ

L'interdisciplinarité est l'essence même du développement de l'ensemble des champs thématiques concernés par ce rapport et pour les Sciences de la Planète en général. Elle a pu se développer progressivement depuis quinze ans grâce à une prise de conscience croissante des objectifs d'ensemble, au-delà des spécificités de chaque programme et de chaque discipline. Ce développement a été favorisé, en France, par la mise en œuvre d'une politique nationale en matière de recherche sur le climat et l'environnement global, sous l'égide de l'INSU, et s'appuyant sur une stratégie commune des organismes et agences. Ce cadre fédérateur doit être renforcé non seulement en interne, mais aussi avec les disciplines et les communautés qui n'appartiennent pas au département SDU. Pour citer quelques exemples, la chimie et la spectroscopie contribuent

de façon essentielle aux études climatiques, l'écologie fonctionnelle et la microbiologie participent de façon essentielle à la caractérisation du fonctionnement des grands cycles biogéochimiques, l'écologie évolutive est essentielle pour la compréhension de l'évolution des biomes sous l'action des forçages climatiques et physiques, la biologie moléculaire apporte des outils qui vont permettre des développements marquants en océanographie biologique, la géographie physique et l'écologie végétale fournissent des clés de lecture des écosystèmes et des paysages pour identifier les hétérogénéités spatiales et caractériser les fonctionnements, et l'approche socio-économique a vocation à compléter les études relatives aux perturbations climatiques et anthropiques de notre environnement, à toutes les échelles.

Un autre aspect structurant important est celui du rôle joué par les programmes européens (environnement et climat ; MAST) dans lesquels notre communauté s'est fortement investie ces dernières années.

Face à cette vision optimiste, il faut néanmoins souligner qu'ils existe un certain nombre de freins, parmi lesquels :

- la sacro-sainte classification d'Auguste Comte qui conduit à vouloir à tout prix mettre les personnes et les structures dans des cases sous prétexte d'assurer une meilleure visibilité,

- la formation initiale parfois trop spécifiquement monodisciplinaire,

- la réduction de la durée des thèses, qui ne facilite pas l'ouverture du doctorant à d'autres préoccupations scientifiques que son travail spécifique, malgré la volonté affichée et le rôle positif que peuvent jouer dans ce domaine les écoles doctorales.

- la difficulté de recruter des chercheurs ou des enseignants-chercheurs dans un autre Département CNRS ou une autre UFR/Université que celui d'appartenance du laboratoire,

- le passage ITA-chercheur ou inversement, devenu quasiment impossible, qui est un frein à une gestion optimisée des personnels scientifiques.