

12

PLANÈTE TERRE : ENVELOPPES SUPERFICIELLES

Francis GROUSSET
Président

Christian P. Allet
Gérard Blanchard
Laurent Bruckler
Philippe Ciais
Philippe Davy
Martine de Angelis
Laurence Eymard
Cyrille Flamant
Andréa Flossmann
Bruno Hamelin
Alain Hauchecorne
Lucile Jocteur-Monrozier
Laurent Memery
Rémy Pichon
Jean-Luc Probst
Bernard Queguiner
Jean-Luc Redelsperger
Serge Robert
Éric Servat
Gérard Thouzeau

Au cours des décennies à venir, nous allons devoir résoudre un ensemble de questions fondamentales qui touchent à l'évolution de la qualité de l'environnement de la Terre. L'activité anthropique croissante va avoir (et a déjà) un impact évident sur la qualité des ressources (eau, aliments), sur la qualité de l'air, sur le réchauffement de la planète et le changement climatique qui lui est associé, et donc sur les populations humaines. La demande sociétale est légitimement forte face à ces questions et les scientifiques se doivent d'apporter rapidement des réponses. La section 12 dans sa configuration actuelle s'investit fortement dans cette démarche en abordant les grands enjeux du futur immédiat tels que : l'eau, la pollution, les déchets, le climat. La section 12 est la structure idéale pour aborder ces problèmes : elle regroupe en effet des spécialistes de disciplines variées (biologie, physique, chimie, etc) qui travaillent transversalement dans les grands réservoirs de la planète (océan, continent, atmosphère). Cette approche transversale permet d'aborder les problèmes aux interfaces et les couplages. De plus, au travers de programmes tels que le programme Eclipse, une collaboration désormais plus active avec les sciences sociales permet de mieux prendre en compte la demande sociétale.

Dans ce document, nous présentons la conjoncture (bilan, évolution, forces et faiblesses), successivement pour chacun des

réservoirs (atmosphère, surfaces continentales, océan, paléoenvironnements), et nous proposons pour chacun d'entre eux des développements souhaitables dans les années à venir (perspective). Nous abordons ensuite des aspects structuraux, qui concernent des problèmes communs à toutes les disciplines (observatoires, bases de données, moyens humains, instrumentation, formation, etc.) Enfin, nous présentons les grands enjeux auxquels la communauté scientifique devra s'attaquer prioritairement dans la décennie à venir : le cycle de l'eau, l'anthropisation du milieu côtier, les déchets et le retraitement des sols, le changement climatique global, la qualité de l'air et la pollution atmosphérique.

1 – CONJONCTURE

1.1 L'ATMOSPHÈRE

L'étude de l'atmosphère, depuis les processus de petite échelle jusqu'à la circulation générale, la physique et la chimie, est le domaine qui couvre le plus d'équipes de recherche de la section 12. Les programmes nationaux PATOM, PNCA, PNEDC ont joué un rôle important de structuration de la communauté scientifique au cours des dix dernières années. Le colloque de prospective INSU/OA en 2000 a permis d'établir les forces et faiblesses de la communauté atmosphérique française, et le présent rapport s'appuie largement sur ses conclusions. On insistera ici davantage sur les évolutions perceptibles et les aspects transversaux, peu ou pas abordés lors de ce colloque.

Bilan

Au cours des dernières années des résultats importants ont été obtenus sur la compré-

hension des processus, grâce à une série de campagnes nationales et internationales, dans lesquelles le rôle des équipes françaises a été essentiel. Ils concernent principalement la dynamique atmosphérique (effet de l'orographie, prévisibilité des phénomènes météorologiques), la physique des nuages dans les systèmes frontaux et tropicaux, les nuages stratosphériques polaires, les flux de surface sur les océans et la couche limite atmosphérique à moyenne échelle, les mécanismes de destruction de l'ozone stratosphérique en région polaire et le transport d'espèces chimiques à travers les barrières dynamiques (tropopause, bord du vortex polaire) et enfin le forçage radiatif direct associé au transport d'aérosols anthropiques.

Les études du climat ont également progressé, en particulier sur le couplage océan – surface continentale – biosphère – cryosphère – atmosphère, et l'inversion du transport atmosphérique des composés à effet de serre pour localiser leurs puits et sources.

L'effort de développement d'outils et méthodologies, soutenu par les programmes, a été le moteur de ces travaux. Citons en particulier les développements qui concernent plus particulièrement :

– **La modélisation numérique** : Les équipes françaises ont d'une part largement progressé sur la modélisation couplée climatique, en s'appuyant sur des collaborations internes et sur la coopération européenne, et ont d'autre part mené à bien la réalisation d'un modèle méso-échelle non hydrostatique communautaire (MesoNH). Parallèlement, elles ont largement contribué aux progrès de l'assimilation de données dans les modèles météorologiques. Ces efforts ont été rendus possibles entre autres par un meilleur accès à des moyens de calcul puissants pour intégrer des modèles complexes, en particulier dans le domaine des simulations couplées océan-atmosphère sur des échelles de temps longues ;

– **les moyens d'observation** : Signalons des progrès notables ces dernières années pour développer l'exploitation des mesures satellitaires et engager les laboratoires français dans l'instrumentation spatiale. La réflexion, engagée

depuis près de 10 ans sur les avions de recherche, se concrétise avec deux nouveaux avions, qui transporteront des instruments nouveaux in situ (chimie, microphysique, aérosols) et de télédétection (lidars, radars), tandis que de nouveaux instruments sous ballon ont été développés en coopération avec le CNES. L'instrumentation sur les navires a également progressé (mesures météorologiques et turbulentes). Enfin, la politique d'observation de l'INSU a permis le développement de plusieurs réseaux pour le suivi systématique de l'évolution de la composition atmosphérique (NDSC, MOZAIC, IDAF).

Évolution et axes prioritaires

L'évolution principale de la recherche atmosphérique est l'étude des « systèmes », impliquant des études sur les couplages entre les milieux adjacents et entre processus physiques et chimiques. Des travaux spécifiques sont donc entrepris pour explorer les interactions d'échelles dans le temps et l'espace (depuis la petite échelle jusqu'à la variabilité inter-annuelle sur le globe), mieux caractériser les « frontières » inférieure (surface et couche limite) et supérieure (tropopause et basse stratosphère), et approfondir la compréhension du couplage physique/chimie dans l'atmosphère sèche (y compris les aérosols) et humide (nuages et précipitations), ainsi que des relations entre l'évolution de la couche d'ozone stratosphérique et le climat. Cet effort se traduit par le couplage de modèles de transport-chimie avec des modèles mécanistes décrivant les flux de composés atmosphériques (flux de CO₂, VOCs, soulèvement des aérosols), et le couplage entre modèles d'océan et atmosphère, entre cryosphère et atmosphère et entre cycles biogéochimiques et atmosphère afin de disposer d'outils de simulation des changements climatiques pour les prochaines décennies.

Les axes prioritaires qui ressortent pour cette décennie sont donc :

1. l'étude multidisciplinaire de la mousson africaine (programme international AMMA initié

par la France), centrée sur le cycle de l'eau et en particulier les systèmes convectifs et leur interaction avec les conditions de surface ;

2. l'étude de la couche limite urbaine (dynamique et pollution atmosphérique) ;

3. l'étude de la micro-physique et physico-chimique dans les nuages et la quantification de leur effet (ainsi que celui des aérosols) sur le bilan radiatif terrestre et la chimie atmosphérique ;

4. l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau (précipitations) à l'échelle régionale, et l'étude de la variabilité climatique à l'échelle régionale ;

5. l'étude de la prévisibilité des phénomènes météorologiques ;

6. l'étude des mécanismes qui contrôlent le forçage radiatif (capacité oxydante, CO₂, production et transformation de l'aérosol) afin de prédire son évolution ;

7. la modélisation couplée qui permet de réaliser des ensembles de simulations longues de l'état de l'atmosphère, de sa variabilité, et de son évolution en réponse à des scénarios d'émission de composés à effet de serre.

Aspects transversaux

Lien recherche/application

Le lien recherche/applications est un défi majeur pour la communauté scientifique. Il apparaît nettement dans les études de l'atmosphère urbaine (impact potentiel sur l'urbanisme, les problèmes de sources de pollution automobile et industrielles), du climat tropical (importance potentielle pour le développement durable), et de l'impact du changement climatique (évolution en matière économique et prévention des risques, y compris de santé). Il s'agit aussi de calculer le changement climatique associé à la mise en place de politiques nationales et internationales de réduction ou de contrôle des rejets de composés à effet de serre (mitigation du changement climatique).

Les expériences de terrain

L'étude de l'atmosphère urbaine (chimie et couche limite complexe) est d'ores et déjà engagée (expériences ESQUIF et ESCOMPTE). Elle réunit des équipes de physiciens et chimistes. La difficulté spécifique est l'extrême hétérogénéité du milieu, et la difficulté de réaliser les mesures dans le milieu urbain. Le programme AMMA comporte une importante phase expérimentale incluant un réseau d'observations pluri-annuel et le déploiement de gros moyens sur plusieurs mois. Ce projet implique une large participation internationale (comme cela avait été le cas pour l'expérience FASTEX), et l'implication forte des équipes scientifiques de pays africains. Presque tous les laboratoires français de la communauté OA participent au projet. Notons que l'étude des interactions d'échelle, et en particulier l'évolution interannuelle, nécessite le développement de réseaux de mesures de type « observatoire », complétés par une exploitation dédiée des capteurs spatiaux, et donc la constitution d'archives thématiques (bases ou centres de données).

Moyens instrumentaux

La communauté française est en phase de renouvellement de sa flotte aéroportée, avec le remplacement des trois avions utilisés dans la dernière décennie (ARAT, Merlin IV et Mystère 20) par deux avions ayant de meilleures capacités d'autonomie et d'emport d'instruments :

1. un avion à turbopropulsion pour l'étude in situ et par télédétection de la basse troposphère et la surface ;

2. un bi-réacteur pour les études de la haute troposphère, la télédétection et le largage de sondes météorologiques (drop-sondes).

Ces avions sont acquis dans un cadre multi-organismes et serviront les objectifs scientifiques ci-dessus, ainsi que des besoins de préparation et validation de capteurs spatiaux. Il convient aussi de ne pas oublier la contribution du CNES avec les ballons et les petites missions spatiales (microsatellites et

minisatellites en coopération internationale). La prospective INSU-OA avait fait ressortir dans ce contexte le besoin de progresser sur l'instrumentation : miniaturisation des capteurs pour embarquement dans les avions ou sur ballons (passage des instruments de laboratoire aux appareils autonomes embarqués, en particulier en chimie) ; automatisation des mesures (pour les réseaux d'observation, et pour avions/ballons) ; développement de capteurs nouveaux ou meilleurs, comme les veines isocinétiques pour analyse à bord des avions.

Études en laboratoire

La modélisation de la chimie atmosphérique requiert la connaissance des mécanismes réactionnels mis en jeu, qui ne peut s'obtenir que par des études en laboratoire des processus chimiques atmosphériques. De même les techniques optiques, largement utilisées pour le sondage in-situ ou à distance de la concentration des espèces atmosphériques, doivent s'appuyer sur des études en laboratoire des spectroscopies de ces espèces.

• **Développement de l'utilisation des moyens satellitaires** : Ainsi que le soulignait le document de prospective INSU/OA, les développements engagés et souhaités dans les prochaines années concernent :

1. 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. L'étude de la physico-chimie atmosphérique s'appuiera fortement au cours des prochaines années sur les expériences satellitaires (ODIN, ENVISAT, METOP, etc.) qui sont les seules à donner accès à l'échelle globale ;

2. la dynamique et les processus impliqués dans les systèmes convectifs tropicaux et des latitudes tempérées : plusieurs missions dans les prochaines années seront dédiées à l'étude des caractéristiques nuageuses et leur propriétés radiatives (comme Calipso/Parasol, Earth-care), auxquelles participent plusieurs équipes françaises. Des missions « cycle de

l'eau et de l'énergie » comme Megha/Tropiques et GPM envisagées à moyen terme sont également fortement soutenues ou proposées par les équipes françaises.

La communauté française a ainsi entrepris un effort important sur l'exploitation des données et le développement de capteurs ou missions dédiées à ces objectifs. Ces efforts devront s'accompagner de mise en œuvre d'instruments de terrain pour la préparation et la validation de ces missions spatiales. L'exploitation optimale des données, en particulier de chimie atmosphérique (traitement des données, mise au point d'algorithmes de restitution des paramètres, validation des capteurs, assimilation des données dans les modèles, interprétation géophysique) représente un travail considérable pour lequel la communauté française (chercheurs et IR) apparaît actuellement sous-critique.

• **Moyens de modélisation** : Les progrès attendus sur les modèles grande échelle et moyenne échelle concernent :

1. la paramétrisation des processus du cycle de l'eau (nuages, précipitation, flux de surface en relation avec l'hydrologie et la végétation) ;

2. le couplage atmosphère – hydrosphère à l'échelle globale (impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau) et à l'échelle des bassins (prévision des crues et sécheresses) ;

3. le couplage physique/chimie, qui a commencé dans les deux types de modèles, et doit se poursuivre en particulier sur la chimie en phase aqueuse ou hétérogène ;

4. le couplage avec les milieux adjacents : surface terrestre et végétation (cycle du carbone), émissions par les feux de biomasse, circulation océanique (variabilité climatique, glaces polaires).

• **Les partenaires** : Les organismes concernés principalement en dehors des laboratoires CNRS/INSU/IRD sont Météo-France et le CNES, le CEA ainsi que le ministère de l'environnement en France. Les sections

ci-dessus montrent que le partenariat avec des agences plus « appliquées » devraient se développer, impliquant certainement le besoin de recherches multidisciplinaires, au-delà du département SDU (cohérence avec l'évolution de l'INSU en INSUE). Cela concerne d'une part l'instrumentation, pour laquelle d'autres départements du CNRS, en particulier SPI, SC, et d'autres organismes ont un rôle à jouer (capteurs physiques et chimiques, automatisation), les besoins pour l'utilisation de l'informatique et méthodes mathématiques (réseaux/distribution, assimilation de données, bases de données et méthodes d'analyse), les relations avec le monde socio-économique (impacts, etc.), et le lien avec santé et agronomie (collaborations interdépartementales au CNRS et avec CIRAD, INSERM, Institut Pasteur).

Par ailleurs, les projets s'inscrivent maintenant presque tous dans un contexte européen et international, impliquant des agences (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme, ESA/Eumetsat, NASA, etc.). L'évolution de la recherche en Europe va vers une plus grande intégration européenne. Citons comme exemple l'organisation européenne pour l'utilisation des avions de recherche (STAARTE devenue maintenant EUFAR).

Il convient enfin de préciser les faiblesses de la communauté. Parmi les actions prioritaires citées plus haut, certaines auraient dû ou pu démarrer plus tôt, si la communauté « atmosphère » n'avait pas certaines faiblesses récurrentes :

1. il conviendrait de réussir le démarrage de recherches réellement interdisciplinaires, ce qui reste un défi pour la communauté (même à l'intérieur de la communauté SDU !) tant au niveau scientifique, structurel que programmatique. Le CNRS et l'INSU-E doivent continuer à soutenir et faciliter les initiatives interprogrammes, et certainement à les renforcer au niveau inter-départemental ;

2. la communauté en atmosphère est assez large, mais les équipes manquent de « visibilité » de l'extérieur (laboratoires – fédérations ou OSU, appartenance au CNRS ou à d'autres organismes, etc.) ; la structuration en

programmes est bonne mais rend complexe le fonctionnement du système vu de l'extérieur ;

3. enfin, le développement des services d'observations et tâches de service implique le besoin de recrutement de personnels spécialisés dans le domaine océan/atmosphère. Par exemple, la masse des données collectées par les avions de recherche de l'INSU et du CNRM depuis 1990, a été sous-exploitée par manque de personnel.

1.2 LES OCÉANS

La recherche en océanographie s'intéresse aux questions abordant la dynamique, le régulation du climat, les cycles biogéochimiques (en particulier celui du carbone), l'anthropisation du milieu naturel et les ressources halieutiques. Au sein de la section 12, ces sont surtout les trois premiers volets qui sont plus particulièrement abordés, avec néanmoins des liens forts avec les deux derniers. Ces dernières années, les progrès observés se sont construits autour d'avancées technologiques majeures (imagerie satellitale, puissance de calcul, automatisations de la mesure, etc.). La recherche s'est en outre fortement appuyée sur l'existence de programmes nationaux (PATOM, PNEDC, PROOF, PNEC) qui ont permis de structurer la communauté et de développer des approches pluri-disciplinaires, nécessaires pour aborder les questions environnementales complexes. Ces programmes nationaux sont en outre très fortement connectés aux programmes internationaux, dans lesquels la communauté française joue un rôle déterminant pour certains d'entre eux, tels que WOCE (circulation océanique à grande échelle), CLIVAR (variabilité climatique), JGOFS (cycles biogéochimiques), SOLAS (composants biogènes océaniques radiativement actifs), GLOBEC (dynamique des ressources vivantes), LOICZ (zone côtière), PAGES/IMAGES (paléocéanographie).

La dynamique de l'océan

Les avancées obtenues par la communauté sur la circulation océanique résultent d'une participation active dans les grands projets internationaux d'observations in situ (WOCE, CLIVAR), d'un investissement important et mondialement reconnu dans la spatial, plus spécifiquement dans l'altimétrie (TOPEX/POSEIDON), et de progrès substantielles dans la simulation numérique. On peut présenter ces avancées selon quatre axes :

1. l'amélioration de la connaissance de la circulation de l'Atlantique grâce à l'analyse des données WOCE et à la simulation numérique associée (projet CLIPPER) ;

2. une meilleure connaissance des processus à moyenne et petite échelles (structures cohérentes, fronts, etc.) et une meilleure quantification de leur impact sur la circulation grande échelle ;

3. la mise au point d'outils d'assimilation de données (altimétrie) dans les modèles de circulation ;

4. le développement de modèles de référence nationale et internationale, que ce soit pour la circulation générale (OPA) ou pour la marée.

Les axes prioritaires de recherche pour les années à venir sont une suite logique des développements actuels et peuvent être déclinés en trois volets, un « grande échelle – climat », un « processus petite et moyenne échelles » et un dernier méthodologique, vers l'application opérationnelle :

1. à la suite de WOCE, et en liaison étroite avec CLIVAR (dans le cadre du PNEDC), étude de la variabilité climatique, avec un accent plus fortement focalisé sur la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord, la région australe, et les latitudes tropicales et équatoriales, en liaison avec le phénomène El Niño et les processus de couplage océan – atmosphère (moussons) ;

2. soutenu principalement par le PATOM, études des processus de transformation de

masses d'eau (subduction, mélange diapycnal, etc.) et d'échanges avec l'atmosphère, ainsi que du rôle de la petite et moyenne échelles (rôle de la topographie, etc.) ;

3. développements en océanographie (pré-) opérationnelle avec assimilation de données, dans le cadre du projet MERCATOR, lié à Global Ocean Observing System (GOOS).

Les cycles biogéochimiques

La communauté française s'est très fortement impliquée dans le projet international JGOFS. Ses points forts concernent la connaissance unique qu'elle a acquise et qu'elle continue de développer sur les régions oligotrophes (Méditerranée, gyre subtropical de l'Atlantique, Pacifique), sur les couplages avec la dynamique à moyenne et petite échelle (Méditerranée, Océan Austral, Atlantique Nord), sur le rôle clé de la silice dans la production primaire et exportée, sur l'observation satellitale de la couleur de la mer, et sur la modélisation numérique et l'assimilation de données. Ces progrès se sont en outre acquis grâce à des développements instrumentaux originaux (préleveurs en conditions hyperbares, suivi automatique de pression partielle de CO_2) et à l'utilisation de techniques analytiques performantes (biologie moléculaire et cellulaire, traçage isotopique). Enfin, l'effort consenti pour mettre en place des séries de mesures à long terme a été important et continue à alimenter la communauté en observations indispensables (Méditerranée : DYFAMED ; Océan Indien : OISO ; Océan Austral : KERFIX – série arrêtée).

Certaines avancées obtenues durant les années 90 ont changé radicalement la représentation des cycles biogéochimiques océaniques. En effet, la vision classique découplant production nouvelle exportable vers l'océan profond et production régénérée localement, basées respectivement sur l'absorption de nitrate et d'ammonium et sur des considérations stœchiométriques simples (rapport de

Redfield), a été entièrement modifiée par la mise en lumière de l'importance de certains processus, tels que la diazotrophie (utilisation d'azote gazeux lors de la photosynthèse) et du rôle du fer dans la limitation de la production dans des régions clé de l'océan mondial (Pacifique équatorial, Austral). En outre, le rôle de la matière organique dissoute a aussi été ré-évalué, et d'une manière générale, la complexité des processus de biodégradation et minéralisation a été fortement mise en avant ces dernières années. Une de conséquences de ces nouveaux paradigmes est de mettre l'accent d'une manière encore plus évidente sur le couplage et les rétro-actions entre chimie, biologie et écologie au sein de l'océan, point essentiel à mieux comprendre dans le cadre des études du changement global et de l'anthropisation de l'océan. Ainsi, tout en gardant l'expertise acquise sur ses points forts, dans les prochaines années, la communauté nationale va se focaliser sur les principaux axes de recherche suivants :

1. les co-limitations de la production primaire (N, P, Si, Fe) ;
2. l'activité hétérotrophe et la minéralisation de la matière organique, domaines d'étude encore trop peu développés actuellement ;
3. le devenir de la matière organique dans la colonne d'eau et le couplage avec le benthos (une des motivations étant de relier les enregistrements sédimentaires à des paramètres environnementaux pour le paléoclimat) ;
4. les rétroactions entre activité biologique marine, chimie océanique, circulation et climat. Ces problématiques scientifiques sont soutenues par le programme national PROOF, et sont intégrées dans les programmes internationaux SOLAS et OCEAN.

Le rôle de l'océan dans le système climatique

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 : ces progrès se sont appuyés sur l'observation grande échelle et sur la modélisation numérique, ainsi que sur le rôle structurant du programme national PNEDC. La majorité des travaux concernant l'océan ont été entamés dans le cadre du programme international WOCE et font maintenant partie intégrante du programme CLIVAR. La problématique scientifique s'est portée surtout sur la variabilité inter-annuelle et décennale de l'océan, en mode forcé et en mode couplé, plus spécifiquement dans trois zones ateliers, à savoir l'Atlantique Nord, les régions équatoriales, et l'océan austral. La stratégie s'est basée sur le développement de modèles numériques complexes, représentant le maximum d'interactions possibles, sur les études de processus, utilisant éventuellement des modèles simplifiés, et sur l'observation et la confrontation des résultats des modèles à ces observations. Un des résultats concrets de cette phase d'étude concerne l'élaboration de modèles couplés atmosphère/océan/glace de mer, avec la prise en compte ultérieure des surfaces continentales, modèles raisonnablement fiables, susceptibles de représenter le climat actuel. Ces modèles doivent permettre de (et ont déjà été utilisés pour) 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 (effet de serre). Ils doivent en outre être testés et améliorés de manière continue par rapport aux longues séries de données disponibles, étendues vers les périodes antérieures aux observations instrumentales par l'intermédiaire de données 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. Les études prévues dans les années à venir sont en continuité avec les travaux passés, c'est-à-dire qu'elles vont se focaliser sur les trois zones ateliers déjà définies, pour lesquelles la communauté a acquis une très bonne expertise. Par rapport aux études antérieures, l'attention se portera surtout sur les processus liés au couplage et à l'intégration d'échelles, question bien posée par exemple dans le cadre du phénomène El Niño, ainsi que sur les problèmes essentiels de

la prédictibilité du système climatique et de la détectabilité de la perturbation anthropique.

L'océanographie côtière

L'océan côtier représente 8 % de la surface océanique. Il est le lieu de fortes interactions entre continent/océan/atmosphère et il a un rôle considérable dans les cycles biogéochimiques et biologiques (15 à 30 % de la production océanique totale et environ 80 % de l'enfouissement de la matière organique) : il est en effet le réceptacle d'arrivée massive de matières organiques terrigènes, de sels nutritifs et de polluants associés. La société est de plus en plus sensible à la préservation de ce milieu fragile accueillant 40 % de la population mondiale (à moins de 100 km des côtes).

La recherche en océanographie côtière s'est structurée autour de deux grands programmes internationaux : LOICZ (Land Ocean Interaction in the Coastal Zone), du PIGB et ELOISE (European Land-Ocean Interaction Studies), et au niveau national, grâce aux deux programmes PNEC et LITEAU.

La communauté a réalisé des avancées récentes dans les domaines :

1. de l'océanographie physique (modèles tri-dimensionnels, utilisation d'ADCP, lien côtier/hauturier), en dynamique sédimentaire (transport des sédiments cohésifs et non cohésifs, instrumentation, modélisation, bilans) ;
2. des cycles biogéochimiques : couplages des processus physiques et biogéochimiques à mésoéchelle, contaminants, eutrophisation, processus à l'interface eau-sédiment, rôle du biologique dans les flux de carbone, rôle du picoplancton ;
3. de la microbiologie : rôle de la microbiologie marine dans la minéralisation de la matière organique, boucle microbienne en estuaire, couplage macrobenthos-processus bactérien ;
4. de la biologie : réseaux trophiques, dynamique des populations, couplage des

processus hydrodynamiques avec les processus biologiques, effet des facteurs anthropiques aux différentes échelles. Ces avancées ont été permises par l'interdisciplinarité, en particulier entre SDU et SDV, et plus particulièrement dans les domaines de la modélisation, de l'écotoxicologie, des biotechnologies, de la biologie moléculaire, etc.

La communauté travaillant sur les zones côtières (laboratoires côtiers, stations marines, OSU) dispose d'atouts majeurs : diversité des compétences, culture de collaborations multi-organismes, réseaux d'observations (exemple : SOMLIT), moyens instrumentaux (stations benthiques, pièges à sédiments, préleveurs), moyens nautiques (flottes INSU et Ifremer), programme de soutien nationaux (PNEC, LITEAU, etc.). Par contre, cette communauté présente des faiblesses : dispersion géographique des laboratoires, adaptation lente au développement technologique, faible développement des modèles prévisionnels, faible lisibilité de l'implication de l'INSU dans leur domaine, communauté des océanographes biologistes partagée entre deux départements (SDU et SDV).

Dans les années à venir, il conviendra de développer les recherches portant sur :

1. la dynamique (rôle des événements exceptionnels, études à l'interface zone côtière/circulation générale, rôle du forçage atmosphérique) ;
2. la biogéochimie (matière organique, contaminants, bilans, flux) ;
3. les études des processus de structuration des écosystèmes à différentes échelles spatio-temporelles, les interactions entre facteurs physiques et biologiques, l'écologie fonctionnelle ;
4. la dynamique sédimentaire, tant au niveau de l'observation que des modèles ;
5. le développement instrumental (par exemple : stations autonomes de type MAREL) ;
6. la modélisation (par exemple : modélisation couplée C/N/P/Si avec apport de l'assimilation de données).

Ces développements nécessiteront :

1. un maintien de la flotte des navires de station et des navires de façade ;
2. un effort pour recruter des ingénieurs permettant des développements technologiques liés aux capteurs ; en particulier, la mise en commun des compétences en électronique, en chimie, en informatique, en reconnaissance des formes, devrait permettre d'aboutir à des systèmes de mesure réellement automatiques dans le domaine biologique ;
3. le recrutement de corps d'observateurs (ORE, OSU, etc.) ;
4. le maintien de programmes de soutien actuels (PNEC, LITEAU) et le développement de programmes nouveaux intégrant mieux les sciences humaines et sociales.

Aspects généraux et recommandations

Pour avancer dans la connaissance du rôle de l'océan dans le climat et les cycles biogéochimiques, une approche multiple devra continuer à être développée. Cette approche est à la fois basée sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation.

Dans le contexte du changement climatique et de l'anthropisation du milieu marin, le soutien aux Services d'Observations et aux OSU doit être maintenu et renforcé. Ce soutien doit être accompagné d'une réflexion stratégique sur le choix des stations retenues, sur l'ensemble des paramètres mesurés et de la fréquence d'échantillonnage, sur la gestion de bases de données qui doivent absolument se développer en parallèle, sur les développements technologiques pertinents à la mesure à haute fréquence automatisée. De même, l'observation satellitale modifie l'ordre de grandeur des flux de données à stocker et échanger : la réflexion déjà entamée à ce sujet au niveau de l'INSU et du CNES devra être poursuivie. Une meilleure compréhension du fonctionnement de l'océan ne peut se faire sans une expérimentation de terrain et en laboratoire

suffisamment développés : cela implique à la fois une flotte côtière et hauturière.

Une meilleure compréhension du fonctionnement de l'océan ne peut se faire sans une expérimentation de terrain suffisamment développée : cela implique à la fois une flotte de façade et hauturière adaptée aux besoins de la demande scientifique, ainsi qu'un effort de gestion et de coordination spécifiques, qui peut et doit certainement pour partie se faire au niveau européen. Les expérimentations en laboratoire ou en milieu contrôlé sont aussi fondamentales pour mieux décrire et comprendre certains processus clé (comme par exemple les instabilités de courant de pente, la formation de tourbillons, la co-limitation de la photosynthèse, la minéralisation de la matière organique, etc.) : les investissements associés doit être facilité, éventuellement par l'intermédiaire des programmes, et le fonctionnement de grands instruments spécifiques et de plateformes dédiées doit être pérennisé et soutenu.

Les moyens nationaux en calcul ont jusqu'à maintenant répondu aux besoins de la communauté des modélisateurs de l'atmosphère, de l'océan et du climat. La croissance des potentialités des gros calculateurs est toujours forte, mais les besoins de la communauté sont très spécifiques par rapport aux autres communautés et la communauté a été et sera amenée à utiliser différentes plates-formes de calcul : ceci implique donc une réflexion sur la gestion de ces besoins de calcul, qui doit aussi s'organiser au niveau européen. Au vu de l'importance de moyens humains nécessaires au développement et au maintien de gros codes, une mutualisation autour de centres ou laboratoires spécialistes est aussi à considérer : cette évolution est en cours au sein de la communauté nationale et semble s'organiser au niveau européen ; elle doit être accompagnée et soutenue par les tutelles.

Même s'il est indiscutable que les progrès de la connaissance scientifique ne peut se construire que sur des bases d'excellence dans les différentes disciplines, le cloisonnement en disciplines classiques ne peut plus fonctionner, surtout dans le contexte des

études sur le climat et l'environnement. La pluridisciplinarité devient incontournable et est déjà d'ailleurs rentrée dans le mode de pensée et de fonctionnement de la communauté dans son ensemble. On peut noter à cet égard le rôle extrêmement structurant des programmes nationaux et de la possibilité de « co-tutelle » associée (comme PNEDC-PROOF, PATOM-PROOF, PNEDC-PNCA, etc.). Il n'en reste pas moins que, tout en ne dégarnissant pas le soutien aux fondamentaux disciplinaires, cette tendance doit être encore renforcée et ouverte à d'autres domaines, comme les sciences sociales : la création de l'INSU-E semble vouloir aller dans ce sens. La voie cherchant à fédérer la recherche et les disciplines autour de problématiques porteuses par l'intermédiaire des programmes nationaux est à encourager : elle apporte en effet souplesse et efficacité, avec une implémentation relativement simple.

La recherche n'est heureusement pas complètement déconnectée de la société, ce qui implique de cette dernière des demandes fortes vis-à-vis de la communauté scientifique. Au vu de l'ampleur de l'impact potentiel de l'activité humaine sur l'environnement et la qualité de la vie, les questions deviennent de plus en plus urgentes et complexes. Ces questions concernent à la fois des enjeux globaux, tels que le changement climatique, le géo-ingénierie (fertilisation à grande échelle de l'océan par le fer, séquestration du CO₂ dans les eaux profondes, etc.), les ressources halieutiques, et des enjeux plus régionaux et locaux, comme la pollution et l'anthropisation de la région côtière, etc. La communauté scientifique se doit d'y répondre dans la mesure de ses compétences. Il est donc nécessaire de réfléchir au lien nécessaire entre avancées en recherche fondamentale, que restent la mission première du CNRS, et demande « sociétale », recherche finalisée : le transfert de connaissances se fait depuis toujours (entre autres par au moins le biais de la vulgarisation), mais un accompagnement pensé et actif, si ce n'est une démarche volontariste dans le sens d'un transfert plus efficace et d'une communication plus ciblée, serait souhaitable : ceci signifie d'éventuellement remettre à plat les critères

d'évaluation des unités et chercheurs, ainsi que de réfléchir à de possibles structures intermédiaires jouant le rôle de « passeurs » entre recherche fondamentale et domaine socio-économique.

d'intégration de disciplines porteuses pour l'étude des surfaces continentales mais qui sont pour le moment peu ou pas encore prises en compte comme la biologie, les mathématiques, les sciences sociales ou économiques, etc.

1.3 LES SURFACES CONTINENTALES

La biogéodynamique de surface et plus particulièrement la dynamique de transfert des éléments dans les cycles superficiels jouent un rôle important dans l'évolution de notre planète. Ces cycles superficiels sont en partie contrôlés par les variations hydroclimatiques régionales et globales et ils sont aujourd'hui perturbés par les activités anthropiques. La communauté scientifique relevant de la section 12 et notamment celle des géosciences de surface prend largement en compte ces thématiques qui relèvent de l'étude de l'environnement continental. Les recherches qui sont développées sur les surfaces continentales concernent les eaux, les sols et la biosphère continentale, mais aussi l'altération et l'érosion des couches superficielles. Ces recherches ont pour objectif une meilleure connaissance, gestion et protection de ces différents réservoirs de surface et de toutes les ressources qu'ils constituent et qu'ils contiennent. Elles s'organisent autour de trois grands volets :

1. eau et matières ;
2. fonctionnement des sols ;
3. écologie quantitative.

Ces recherches qui concernent différents réservoirs continentaux de surface et les interactions entre ces différents réservoirs se développent également à l'interface avec les recherches menées dans l'atmosphère et sur les océans, notamment sur les zones côtières et les plateformes continentales. Elles font nécessairement appel à plusieurs disciplines qui interagissent fortement. Depuis plus d'une dizaine d'années, l'inter/pluridisciplinarité s'est développée pour étudier ces surfaces continentales mais il reste encore de larges possibilités

Eau et matières

Ce premier grand volet concerne l'une des ressources les plus importantes de notre planète, l'eau, aussi bien pour sa quantité que pour sa qualité. Cela concerne les sources, les ruisseaux, les rivières, les fleuves, les lacs, les nappes phréatiques et les aquifères souterrains mais aussi leurs sources d'alimentation que sont les pluies, les neiges et les glaciers. Ces ressources sont aujourd'hui fragilisées par les changements climatiques (désertification ici, crues et inondations là), l'accroissement de la population (demande croissante en eau), l'augmentation des pollutions (industrielles, agricoles et domestiques qu'elles soient d'origines diffuses ou ponctuelles), l'aménagement des cours d'eau (berges, barrages et retenues), l'irrigation croissante etc. Une prise de conscience par la communauté scientifique de l'enjeu que représente ces ressources en eau pour les décennies à venir a permis de mobiliser et de coordonner ces dernières années les recherches sur l'eau dans le cadre de grands programmes (Programme National de Recherche en Hydrologie, Programme National Sol et Érosion, GIP Hydrosystèmes, ACI Eau et Environnement, HAPEX, etc.). Des progrès ont été réalisés en ce qui concerne l'approche intégrée du cycle de l'eau, notamment en domaine continental, l'intégration et le couplage de différentes disciplines autour de problématiques liées à l'eau. Ces progrès ont été réalisés en partie grâce une mobilisation des acteurs de la recherche autour d'ateliers thématiques et de chantiers géographiques (bassins versants de recherche expérimentaux (BVRE), zones ateliers (ZA) du GIP Hydrosystèmes puis du Programme Environnement, Vie et Sociétés (PEVS) du CNRS, Grands Bassins Fluviaux de PEGI puis du PNSE, et tout récemment les Observatoires de Recherche en

Environnement (ORE) lancés par le Ministère), cherchant toujours à répondre à des questions scientifiques, sans perdre de vue les enjeux de société de manière à répondre aux questions posées par le monde socio-économique.

Cet effort doit être poursuivi et renforcé au cours des prochaines années, notamment à des échelles régionales et à l'échelle globale, en veillant bien à insérer ces chantiers à des réseaux internationaux (LTER par exemple). Les recherches devraient s'articuler autour de trois grands domaines :

- interface Surfaces Continentales (Sol-végétation)/Atmosphère avec l'étude des transferts d'eau et de matières (particules, gaz, polluants) dans les deux sens (dépôts et émissions par exemple) ;

- écoulement superficiel avec l'infiltration, le ruissellement et les écoulements fluviaux. On intègre là les transports de matières solides, colloïdales et dissoutes qu'elles soient produites par l'érosion des sols, l'altération des roches et les pollutions ou qu'elles soient d'origine atmosphérique, ainsi que les interactions avec la biologie. L'effort devrait porter sur les zones contributives et notamment sur les zones saturées en eau, plaines d'inondation et autres varzeas qui jouent un rôle fondamental sur les transferts superficiels de matières ;

- relation sol - sous sol avec notamment les transferts d'eau et de matières en zone racinaires et le transport souterrain (relation entre les fluides et le milieu). Un effort devra être fait pour le couplage hydro-géochimie, pour palier au manque de données sur la cinétique et pour aborder les changements d'échelles de temps et d'espace.

Le fonctionnement du sol

Le sol est l'un des réservoirs les plus importants de notre planète, il joue un rôle de premier plan dans les cycles biogéochimiques et il représente un support et une ressource de base pour les activités humaines. Le sol est aujourd'hui considéré comme un réacteur

biogéochimique qui occupe une position clef à l'interface entre l'atmosphère, la biosphère, la lithosphère et l'hydrosphère, et dans lequel interagissent des matières minérales, des matières organiques, des solutions aqueuses, des gaz et des organismes vivants. Comme pour la ressource en eau, le sol est aujourd'hui fragilisé par les changements climatiques et par les activités anthropiques (déforestation, mise en culture des terres, pollutions industrielles et agricoles etc.). Le sol doit aussi être considéré comme un milieu récepteur, notamment des polluants organiques et minéraux, dont la capacité de rétention et le pouvoir d'autoépuration ont des limites qu'il faudra chercher à définir dans les années à venir. Les sols sont les archives de l'altération des roches et des interactions avec l'atmosphère et la biosphère. C'est enfin la formation et l'érosion de ces sols qui vont alimenter les transports de matières par les eaux de surface et les eaux souterraines.

La communauté française travaillant sur les sols à commencer à se structurer ces dernières années avec la mise en place du Programme National sur les Sols et l'Érosion (PNSE) et plus récemment du GIS Sol. Néanmoins cette communauté doit continuer ses efforts de structuration et développer ses recherches autour des thèmes suivants :

- écodynamique des polluants et charges critiques dans les milieux récepteurs : réactivité et devenir des polluants, charges admissibles en polluants dans les sols. La communauté française a su développer un savoir faire sur la caractérisation des matériaux du sol et sur les interactions entre les différents constituants du sol, y compris les substances polluantes. Il faudra veiller ces prochaines années à la représentativité des processus et à développer des modèles conceptuels à différentes échelles allant des échelles locales à régionales. Ces modèles devront être des modèles dynamiques couplant les processus de transport, de sorption et de biotransformation ;

- altération et matières minérales (argiles, oxydes, carbonates) : les efforts porteront sur les carbonates dont l'accumulation dans les sols pourrait jouer un rôle important de puits de

CO₂, ainsi que sur le développement de modèle d'altération à l'échelle des grands bassins fluviaux et à l'échelle globale. On devrait aussi continuer les efforts sur le couplage des processus et sur leur résultante ;

– fonctionnement microbiologique des sols : relations avec l'état physique du sol et ses caractéristiques physico-chimiques. Les couplages entre ces composantes sont importants si la communauté veut développer sa capacité à prévoir l'évolution des milieux ;

– matières organiques : nature, réactivité, temps de résidence des matières organiques dans les sols restent au cœur des recherches, notamment par rapport au cycle global du carbone et à l'émission des gaz à effet de serre (sol : puits ou source de CO₂, N₂O, CH₄). Les matières organiques se trouvent également au cœur des processus affectant l'écodynamique des substances polluantes (sorption des micropolluants organiques, complexes organo-métalliques, activité microbienne) et justifient donc le développement de recherches sur ce thème. Ces prochaines années devraient voir le développement de modèles à des échelles régionales et globales, intégrant le mode d'occupation des sols et robustes sur des échelles de temps longues.

L'écologie quantitative

En reprenant ici le thème fondateur d'une ACI (1998-2002), on souligne toute la difficulté qu'à notre organisme à structurer la communauté scientifique pour faire avancer les connaissances d'objets ou de systèmes qui relèvent de plusieurs disciplines.

Cette thématique concerne deux volets majeurs :

1. l'écologie fonctionnelle, c'est-à-dire l'étude du fonctionnement et de la dynamique des populations en relation avec l'évolution du milieu physique, de l'impact de ce fonctionnement sur le milieu physique, de l'étude des microorganismes et de leurs interactions avec les minéraux, les polluants, et les matières organiques ; et par ailleurs ;

2. l'écotoxicologie (prise au sens de l'étude de la toxicologie pure, mais aussi de la toxicologie en rapport avec le fonctionnement des systèmes : milieux récepteurs, charges critiques, etc.).

Une mention particulière doit être faite sur la modélisation numérique qui a été peu représentée dans les propositions reçues au PNSE, alors qu'elle peut susciter des questionnements majeurs. Les sols sont des milieux complexes, pour lesquels la modélisation constitue une approche et doit conduire notamment à l'élaboration de modèles descriptifs et prédictifs robustes, et ceci aux différentes échelles d'organisation du sol. Il est nécessaire de développer des démarches permettant d'intégrer les données acquises à ces différentes échelles, depuis le niveau moléculaire aux données de terrain obtenues à l'échelle du profil ou du bassin versant. Il conviendrait pour cela d'attirer de nouvelles communautés. Nous avons pour cela l'avantage que de nombreux champs scientifiques sont de grande actualité, comme la non-linéarité des systèmes, l'hétérogénéité spatiale et la hiérarchisation des échelles en relation avec une description fractale de l'organisation des sols ou encore l'hétérogénéité temporelle et la variabilité périodique (saisonnière). L'évolution des sols, de leurs caractéristiques morphologiques et fonctionnelles, sous différentes contraintes, climat, anthropisation, nécessite d'aller au-delà de la description de processus, connus dans leurs principes, mais dont les constantes de temps restent encore méconnues.

Le développement de nouveaux métiers ne doit pas faire oublier que les connaissances antérieures doivent être utilisées, complétées. Des domaines, comme la pédologie, la genèse et les propriétés des minéraux argileux, dans lesquels le CNRS avait une situation internationale de premier plan, se trouvent actuellement délaissés. Il faut veiller à conserver des équipes performantes, dans un cadre renouvelé, permis à la fois par les nouvelles approches physico-chimiques et biologiques, et par l'intégration de ces problématiques dans le cadre plus général du fonctionnement de la biosphère continentale, la plus marquée par l'anthropisation.

1.4 PALÉO-ENVIRONNEMENTS ET PALÉOCLIMATS

Pourquoi étudier les paléo-environnements ? Les données instrumentales permettent de contraindre la variabilité du système climatique sur quelques siècles, et ne sont donc pas suffisantes pour décrire cette complètement variabilité. Il faut ainsi faire appel aux données paléoclimatiques pour étendre les séries instrumentales et documenter l'évolution du climat, tant naturelle que perturbée. En effet, 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 recherches en cours ont pour objectif d'étudier les mécanismes des changements de climat aux diverses échelles de temps, du million d'années à la décennie. Ces différentes échelles de temps géologiques permettent d'appréhender les relations entre le climat, la tectonique, l'érosion et les gaz à effet de serre (plus particulièrement CO_2 et CH_4). Plus particulièrement, les cycles glaciaire/interglaciaire illustrent la réponse au forçage de l'insolation et documentent les principales rétroactions agissant dans les différents composants du système climatique. Cette approche permet de mettre en perspective la perturbation anthropique au 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'enjeu essentiel est la reconstitution des principaux paramètres physiques, chimiques et biologiques (transfert de chaleur, CO_2 , productivité biologique terrestre et marine, etc.) qui permettront de contraindre les expériences liées au développement de modèles couplés atmosphère-océan-cryosphère-biosphère capables de simuler les climats différents du climat actuel, ainsi que leurs variations rapides.

Au plan international, la communauté française a jusqu'à présent joué un rôle moteur pour l'étude des climats anciens. Elle a participé activement aux programmes GRIP et Vostok de forage glaciaire et elle a la co-responsabilité du programme de forage EPICA au Dôme C (Antarctique). Elle anime le programme international IMAGES de carottage des fonds marins destiné à obtenir des enregistrements à haute résolution des changements climatiques océaniques, prélevés grâce au Marion-Dufresne (Institut Paul Émil Victor). Un rapprochement avec le programme IODP (plateformes opérationnelles communes) est désormais amorcé. Dans le domaine continental, l'intensification et la diversification des travaux de paléoclimatologie continentale ont permis de développer une base de données obtenue par les équipes européennes en Europe et en Afrique. Citons en particulier l'étude de longues séquences lacustres et de séquences de loess qui ont permis de préciser les variations de la biosphère au cours de plusieurs cycles glaciaires/interglaciaires. Ces données servent entre autres à valider les modèles paléoclimatiques dans le cadre du programme PMIP, piloté par la France. Au niveau international, l'activité paléocéanographique a été longtemps centrée sur les études à grande échelle temporelle de type ODP. Certains domaines ont été négligés (les environnements côtiers anthropisés, les forages continentaux).

Dans les dix ans qui viennent, il va falloir améliorer les panoplies d'outils d'investigation des environnements anciens. En particulier, au niveau de l'interface eau-sédiment océanique, il faut comprendre les mécanismes et quantifier les taux des transformations biogéochimiques dans le but d'obtenir des paléomarqueurs plus fiables de la productivité, de la dynamique de la circulation thermohaline, de l'évolution paléoclimatique. Cet effort est lancé dans le cadre de PJTT. Ceci nécessitera de développer la modélisation des flux de matière en conditions non-stationnaires. Des changements de composition de l'atmosphère ont été mis en évidence dans les archives glaciaires ; l'étude des sédiments marins a permis d'identifier de fortes variations des circulations océaniques liés à la variabilité climatique ; 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 (N, Si, P) est mieux connu. Une attention particulière devra désormais être portée sur la mesure et l'interprétation des variations climatiques très rapides (à l'échelle d'une vie humaine) détectées simultanément dans les forages de glace, les archives sédimentaires (cernes des arbres, tourbières, lacs, coraux). Il conviendra de tendre vers une résolution de l'ordre de la saison ou de l'année. À des échelles de temps plus longues, les carottes de glace et les forages océaniques conduits dans le cadre du programme IODP continueront à être les outils fondamentaux. 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 500 000 dernières années qui représentent les quatre derniers cycles climatiques). On connaît le rôle de premier plan joué par la communauté française dans ce domaine, ainsi qu'en témoigne l'attribution de la médaille d'or 2002 du CNRS à deux acteurs de cette communauté.

Recommandations. La communauté nationale dispose maintenant de modèles couplés océan/atmosphère. Les simulations faites sont de qualité. L'introduction d'un modèle de glace de mer incluant les modules thermodynamiques et dynamiques (en cours de développement) permettra de disposer d'un outil performant pour analyser et projeter les variations naturelles ou anthropiques à l'échelle de quelques décennies. Les modèles globaux (OGCM, AGCM) doivent continuer à être testés pour des situations climatiques extrêmes (interglaciaires, glaciaires). Par ailleurs, les besoins des modélisateurs concernent désormais des échelles de temps plus courtes, et il conviendra d'accentuer l'effort sur les études portant sur les 2000 dernières années, et ce à très haute résolution afin d'identifier la variabilité à l'échelle du siècle ou de la décennie.

Les systèmes d'observation de l'évolution de l'environnement. 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 et des séries continentales a permis de quantifier la variabilité climatique à long terme et de mettre en évidence des variations brutales, 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. L'effort d'observation en continu doit être poursuivi, en particulier du fait du contexte nouveau induit par le réchauffement global.

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. De telles approches des paléoenvironnements ont été réalisées dans la cryosphère (GRIP, EPICA), dans les domaines océanique (IMAGES) et continental (PEP) : elles devront être renforcées dans le futur, certainement à l'échelle européenne.

Cet effort nécessitera la poursuite du développement d'outils technologiques (plateformes de carottage/forages aptes à mieux carotter la glace, les sédiments océaniques et lacustres, les coraux) et le développement de l'instrumentation nécessaire à l'étude de ces enregistrements (automatisation des mesures physiques non destructives en continu). Les équipes techniques de développement, d'analyse en laboratoire et d'intervention sur le terrain devront être au minimum maintenues, voire renforcées.

La comparaison entre les enregistrements obtenus dans les différents réservoirs nécessitera d'améliorer significativement les échelles chronologiques. Du fait de l'imprécision de approches actuelles, on a encore du mal à mettre en phase les échelles obtenues sur les carottes glaciaires, continentales et marines. En domaine océanique, une meilleure connaissance des

« ages-réservoirs » doit être atteinte si l'on veut améliorer la précision des datations absolues.

En soutien à ces recherches, un flux convenable de recrutements caractérise les domaines du paléocéan et de la glaciologie. Si l'on considère la pyramide des âges, on constate que cet effort doit être maintenu. Par contre, les domaines continentaux et côtiers sont moins bien lotis, et il conviendra de veiller à recruter sur les domaines lacustre et côtiers (lagunes, estuaires, tourbières, etc.) très sensibles à l'impact anthropique.

Ces recherches ne peuvent être conduites que dans le cadre de programmes internationaux. Ainsi, le PMRC a montré un intérêt croissant du vis-à-vis des climats du passé, à travers son projet CLIVAR. Par ailleurs, le PIGB manifeste un intérêt soutenu pour l'étude des paléoclimats et de leurs interactions avec les paléoenvironnements au travers du programme PAGES (dont IMAGES et PEP sont respectivement les volets océanique et continental).

Au niveau national, ces recherches ont été jusqu'à présent soutenues en partie par de multiples programmes. Désormais, un regroupement très bénéfique des efforts se poursuit au sein du programme national ECLIPSE (CNRS) et les efforts engagés par la communauté française pour construire des réseaux d'excellence européens devront être renforcés dans le cadre du 6^e PCRD.

1.5 ASPECTS STRUCTURAUX

L'observation de la Terre nécessite d'acquérir des quantités massives de données, parfois en continu, et à différentes échelles. Dans les années qui viennent, l'acquisition et le traitement de ces données nécessiteront un personnel particulièrement qualifié. Ce besoin est indépendant des disciplines, des contours des sections, des domaines d'application, des tutelles : il devra être traité de manière transversale, interdisciplinaire. Outre le besoin en personnel, il nécessitera le déve-

loppement de structures d'observations, et des avancées d'ordre technologique. À noter que l'arrivée de plus en plus massive de données satellitaires a déjà commencé et continuera à amplifier fortement (i.e. quantitativement et qualitativement) les problèmes d'adéquation entre objectifs scientifiques et/ou opérationnels souhaitables, et moyens humains, méthodologiques et technologiques potentiellement disponibles. Un problème nouveau tient à la difficulté de rendre cohérentes dans l'espace et dans le temps les grandes quantités de données dont les origines et les méthodes de mesures sont des plus diverses. Cet aspect récemment apparu dans les bases de données des grandes campagnes internationales de mesures de ces dernières années, doit être pris en compte par des équipes scientifico-techniques hautement compétentes, sous peine de voir leurs résultats sous-exploités ou entachés de biais importants.

Des techniques de pointes

Une meilleure connaissance des enveloppes superficielles de la Terre passe nécessairement par l'évolution des techniques et des outils. Les avancées réalisées dans ce domaine depuis une dizaine d'années tiennent pour beaucoup aux progrès technologiques et méthodologiques. Ces progrès se situent au niveau de l'acquisition des données et de leur traitement : nouveaux outils (satellites, lasers, radars, bouées, carottiers géants, spectrométrie de masse, biologie moléculaire, etc.), électronique et mécanique plus performantes (capteurs, lasers, miniaturisation, traitement du signal, automatisation), calculateurs plus rapides, etc. Les données sont désormais rassemblées dans des bases de données nationales et européennes (par exemple : Médias-France, JGOFs-France, Pangea, etc.). Toutes ces étapes nécessitent des moyens humains, de la formation, des recrutements spécifiques en chercheurs et ITA regroupant des compétences pluridisciplinaires. (par exemple physique de l'atmosphère et informatique, modélisation et biologie, etc.).

Des structures d'observation

L'évolution passée et le devenir de notre milieu de vie soumis de plus en plus aux effets néfastes de l'anthropisation, nécessite de surveiller l'évolution de paramètres majeurs, tels que la qualité de l'eau et de l'air tant sur les zones continentales qu'en milieu côtier, et de suivre le réchauffement global de la planète. Depuis quelques années, la communauté a pris conscience que l'étude de l'évolution temporelle des enveloppes superficielles (océan, atmosphère, surfaces continentales) passe par l'acquisition de séries temporelles de mesures réalisées en continu sur des périodes de temps « longues » (idéalement plusieurs décennies). Ces « observatoires » de l'environnement existent déjà pour certains (OSU, stations marines), d'autres ont débuté en 2002 (ORES) ; par contre, les besoins d'observatoires en domaine continental sont plus criants, et leur mise en place devrait être envisagée dans un avenir proche. Ces structures devront être coordonnées au plan national, et surtout elles devront être pérennes, ce qui pose le problème des moyens humains nécessaires.

Des savoir-faire à consolider

Or l'examen de la pyramide des âges au sein de la section 12 (en particulier en ce qui concerne les ITA) montre que nous allons au devant d'une diminution massive des capacités analytiques et techniques, qui est alarmante dans certains domaines. Il est donc essentiel de pérenniser les expertises lors des recrutements (chercheurs et ITA).

Ceci passera entre autres par des fléchages de postes de chercheurs et d'ITA, stabilisés sur plusieurs années, à définir en concertation avec les directions de département, les directeurs d'unité et la section. En ce qui concerne les ITA, des départs en retraites massifs se profilent pour les toutes prochaines années et il conviendra d'anticiper le déficit massif en ITA qui s'annonce.

Il faudra aussi veiller aussi à accentuer la formation continue dans les thématiques en

développement. Les besoins en formation sont clairement exprimés dans les plans quadriennaux (PFU) fournis par les unités. Ils concernent trois domaines majeurs :

- la manipulation et l'utilisation des données (les bases de données, la modélisation, les réseaux) ;
- l'acquisition des données (électronique, traitement du signal, spectrométrie de masse) ;
- la gestion de projets, pour les unités travaillant dans le domaine spatial ; pour les unités ayant une forte implication sur le terrain, le besoin de chefs de campagne est fort mais on se heurte à l'absence d'une définition adéquate dans les métiers du CNRS ;
- des formations en techniques nouvelles, la biologie moléculaire par exemple.

Recrutements de chercheurs

La diminution des étudiants en sciences (en particulier en sciences physiques) induit une diminution du nombre de doctorants : cette tendance pourrait-elle induire dans un avenir proche des problèmes de recrutement inquiétants ? Par ailleurs, dans la perspective de ces problèmes potentiels de recrutement, et en prenant en compte une ouverture européenne inévitablement plus marquée, ne faudra-t-il pas adapter notre système de recrutement, qui se révèle trop rigide (limite d'âge CR2, manque de postes de postdoctorant au CNRS pour étrangers, etc.) ?

Spécificités de la recherche sur les enveloppes superficielles de la Terre

Bien que largement développées dans les chapitres précédents, ces spécificités sont si importantes qu'il convient d'en rappeler les traits principaux. Elles concernent :

- le lien recherche/applications est un défi majeur pour la communauté scientifique. Il est nécessaire de réfléchir aux liens néces-

saires entre avancées en recherche fondamentale (qui restent la mission première du CNRS), et demande « sociétale » (recherche finalisée). Il conviendra par exemple d'évaluer le changement climatique associé à la mise en place de politiques nationales et internationales de réduction ou de contrôle des rejets de composés à effet de serre. Ceci impliquera d'éventuellement repenser les critères d'évaluation des unités et des chercheurs, et de réfléchir à des structures connectant recherche fondamentale et milieu socio-économique ;

– les études en laboratoires doivent être poursuivies, mais toujours couplées à des expériences de terrain. Celles-ci nécessitent le développement de réseaux de mesures de type « observatoire », complétés par des constitutions de bases (et centres) de données ;

– des moyens instrumentaux sont nécessaires. La communauté française est en phase de renouvellement de sa flotte aéroportée. La prospective INSU-OA avait fait ressortir dans ce contexte le besoin de développements nouveaux (miniaturisation, capteurs nouveaux, développement de l'utilisation des moyens satellitaires). De même, dans le domaine océanique, l'expérimentation de terrain nécessite le développement des flottes côtière et hauturière. Le fonctionnement de grands instruments spécifiques et de plateformes dédiées doit être pérennisé et soutenu. Ces grands instruments présentent souvent un volet « coopération européenne » et leur développement nécessiterait un accroissement des échanges d'ITA avec les laboratoires étrangers ;

– des moyens de modélisation : des progrès sont attendus sur les modèles grande échelle et moyenne échelle (paramétrisation des processus du cycle de l'eau, couplage atmosphère – hydrosphère, couplage physique/chimie, couplage avec les différents réservoirs. Une mutualisation des moyens autour de centres ou laboratoires spécialistes est aussi à considérer, probablement à l'échelle européenne ;

– des partenaires nombreux : Météo-France, CNES, CEA, CIRAD, INSERM, Ministère de l'Environnement, etc. Le partenariat avec ces agences plus « appliquées » devra se développer

dans un cadre multidisciplinaire, au-delà du seul département SDU, et donc en cohérence avec l'élargissement de l'INSU à l'INSU-E. Ces partenariats devront être renforcés au travers de programmes. On peut noter à cet égard le rôle extrêmement structurant des programmes nationaux et de la possibilité de « co-tutelle » associée (citons par exemple : PNEDC-PROOF, PATOM-PROOF, PNEDC-PNCA, etc.). Par ailleurs, les projets s'inscrivent maintenant presque tous dans un contexte européen et international, impliquant des agences (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme, ESA/Eumetsat, NASA, etc.). L'évolution de la recherche en Europe va vers une plus grande intégration européenne.

2 – PROSPECTIVE : LES ENJEUX DU FUTUR

Afin de répondre à une demande sociétale légitimement forte face à l'évolution rapide des problèmes environnementaux, la section 12 devra s'investir plus massivement dans des recherches portant sur les grands enjeux du futur immédiat tels que : le cycle de l'eau, l'océanographie côtière, les déchets et l'anthropisation, la qualité de l'air et la pollution atmosphérique, le réchauffement global de la planète. De par sa large couverture thématique, la section 12 est au centre des préoccupations de l'INSU-E. Ces « enjeux du futur » justifieront à l'avenir un ancrage plus affirmé sur les « problèmes environnementaux », au sens social du terme. Dans ce nouveau cadre plus finalisé, il conviendra de veiller à préserver la place des recherches fondamentales.

2.1 LE CYCLE DE L'EAU

Le cycle de l'eau dans le système climatique traduit les échanges d'eau sous ses trois phases entre l'océan, l'atmosphère, les continents et les calottes polaires en réponse aux variations de flux d'énergie. Ces échanges d'eau s'effectuent par le biais de précipitations, d'évapotranspiration et de ruissellement dans les réseaux hydrographiques continentaux. Les variations du climat affectent le cycle de l'eau en modifiant les régimes des précipitations et l'évapotranspiration, et par voie de conséquence, le contenu en eau dans les sols, le manteau neigeux, les débits des fleuves et l'étendue des zones d'inondation. À l'inverse, la variabilité spatio-temporelle de l'humidité des sols et du manteau neigeux agit en retour sur le climat. La connaissance et le suivi du cycle de l'eau sont également importants en relation avec les activités humaines (aléas, ressources, pollution). L'enjeu est de quantifier les termes de flux entre les différents milieux, les transports et le stockage de l'eau.

Des progrès nets ont été accomplis dans trois domaines : les phénomènes convectifs et leur modélisation, l'hydrologie continentale et les flux de surfaces (évapotranspiration, flux de chaleur sur les océans). Les moyens qui ont permis de réaliser ces progrès consistent en des expériences majeures, (Toga/Coare, Fastex, MAP, les campagnes HAPEX), le développement de la modélisation atmosphérique et hydrologique et l'utilisation de mesures spatiales (surfaces continentales, océans).

Dans ce domaine, les zones polaires ont été faiblement explorées expérimentalement jusqu'à présent, et les modèles concernant ces zones sont insuffisamment précis (dynamique + thermodynamique des glaces de mer, atmosphère polaire). Jusque-là, peu d'études ont été conduites sur l'ensemble du cycle (surface – atmosphère), entre autres en raison de la spécialisation des équipes sur atmosphère ou surface. Le GDR Antarctique est une réponse provisoire au besoin d'études sur les régions polaires. Mais des projets plus concrets mériteraient d'être développés.

Parmi les actions en cours, le projet AMMA est le premier projet qui aborde le cycle de l'eau dans sa globalité (différentes échelles spatiales et temporelles, différents milieux, approches par l'observation *in situ*/télé-détection et modélisation), ainsi que les aspects « appliqués » (impact des variations sur le couvert végétal, impact de l'anthropisation du milieu sur le cycle de l'eau). Par ailleurs, parmi les observations spatiales proposées par la communauté scientifique (avec forte présence française), GRACE permettra d'évaluer la masse d'eau souterraine, SMOS fournira pour la première fois un suivi global de l'humidité de surface, Megha/Tropique suivra le cycle de vie des systèmes tropicaux, et la constellation GPM (qui inclut la précédente) fournira les précipitations sur le globe.

Concernant les développements à promouvoir, la modélisation non-hydrostatique est l'outil de modélisation indispensable pour les phénomènes convectifs. Des progrès sont attendus sur le couplage entre modèles atmosphériques et modèles de surface continentale (hydrologie + végétation). L'assimilation de mesures de télé-détection (précipitations, humidité de surface, caractéristiques de la végétation) est un des progrès attendus. Ces approches sont à développer avec Météo-France (aléas hydro-météorologiques), le CEMAGREF, le BRGM.

2.2 L'Océanographie Côtière

Zone de contact entre le milieu terrestre et le milieu marin, le milieu littoral et côtier est l'exemple même d'une zone conflictuelle tant les intérêts sont contradictoires et les enjeux majeurs pour l'humanité dans les prochaines années où plus de 60 % de la population humaine vivra à moins de cinquante kilomètres d'un rivage. C'est un domaine ou plutôt un « éco-sociosystème », où les approches monodisciplinaires n'ont pas de sens et où il devient essentiel de confronter les acquis, les expériences, et faire des propositions pluridisciplinaires dans tous les domaines des sciences de la terre, de la vie et des sciences

humaines. Il apparaît nécessaire d'intégrer les recherches sur le littoral et le milieu côtier dans un contexte spatial à grande échelle à la fois du côté terrestre (bassin versant) et océanique, de bien identifier ce qui est à l'intérieur et à l'extérieur des systèmes qui peuvent être emboîtés et d'appréhender les diverses échelles spatio-temporelles d'observation. Ces milieux d'interface présentent une très forte hétérogénéité spatio-temporelle à toutes les échelles de temps et d'espace et sont soumis à une forte variabilité des conditions environnementales. Dans cet écosystème complexe, il convient d'analyser plus en profondeur les processus et mécanismes fondamentaux permettant de comprendre son fonctionnement et de préciser la part respective des évolutions naturelles climatiques liées à des phénomènes à grande échelle des phénomènes plus locaux où la part de l'anthropique est forçant. Outre les approches pluridisciplinaires, les besoins en équipement portent à la fois sur des moyens nautiques (flotte hauturière et navires de façades), le développement de structure expérimentale dans les stations marines et in situ, et des besoins en observations in situ (structure autonome de mesures du littoral et des mers côtières) et en télédétection. L'essor des services et structures d'observation à des échelles de temps écologiques de l'année au siècle avec des analyses rétrospectives et prospectives est un enjeu majeur de la recherche de ce début du XXI^e siècle.

Un aspect particulier des régions côtières concerne les modifications physiques du trait de côte (érosion, accumulation, envasement). Ils touchent très directement les activités socio-économiques (aquaculture, ostréiculture, pêche, tourisme). La société est de plus en plus concernée par les problèmes de pollution par les métaux ou les hydrocarbures, qu'ils viennent du continent, ou qu'ils soient liés à des « marées noires ». Ces problèmes doivent être abordés de manière prioritaire, au travers d'approches pluridisciplinaires nécessitant à la fois les expertises en sédimentologie, hydrodynamique, chimie des contaminants, impacts sociologiques, qui nécessitent donc une action commune des départements SDU, SDV, SHS, SPI du CNRS, et une forte coordination avec les autres organismes. Un programme

inter-organismes regroupant tous les acteurs concernés (CNRS, IFREMER, CEMAGREF, MATE, INRA, IRD, BRGM, SHOM) devrait être mis sur pied prioritairement.

D'une manière générale, les champs de recherche qui doivent être considérés dans les années à venir sont : la géomorphologie et le trait de côte, les cycles biogéochimiques et la dégradation des milieux côtiers, les problèmes de santé humaine (microbiologie, consommation de coquillages, contaminations chimiques, etc.), la gestion durable des écosystèmes du littoral.

2.3 DÉCHETS ET ANTHROPISATION

Les activités anthropiques qu'elles soient domestiques, agricoles ou industrielles génèrent des déchets et engendrent des pollutions (ponctuelles ou diffuses) qui vont contaminer directement ou indirectement les différents réservoirs de notre planète, notamment les réservoirs de surface (sols, eaux et biosphère), et représenter un risque sanitaire pour les végétaux, les animaux et les hommes.

La gestion de ces déchets et de ces pollutions est l'un des enjeux majeurs de l'environnement pour les années à venir. Une meilleure gestion de ces déchets passera nécessairement d'abord par un effort de réduction des apports, mais aussi par le traitement, la valorisation et le stockage de ces déchets, et par la rémédiation des milieux contaminés.

Cet effort demande une très bonne connaissance des milieux récepteurs et des organismes qui vivent dans ces milieux, de façon à comprendre leur interaction ultérieure avec les polluants apportés.

La diversité des déchets (déchets primaires comme les déchets miniers, agricoles, industriels, domestiques, les déchets du BTP etc. et déchets secondaires comme les boues de station d'épuration, les cendres, les mâchefers, etc.) ainsi que la diversité des pollutions (organiques, minérales, nucléaires, etc.) nécessitent une approche inter/pluri disciplinaire faisant

appel aux disciplines des sciences de la terre, de la biologie, de l'agronomie, de l'écotoxicologie mais aussi au génie des procédés et aux sciences sociales et économiques.

Les recherches devraient s'orienter au cours des années à venir vers la spéciation des éléments toxiques et non seulement vers leur concentration totale que ce soit dans les déchets/pollutions, dans les milieux fortement contaminés (concentrations élevées en polluants) ou dans les milieux à priori naturels (faibles concentrations en polluants). Un effort doit être fait par la communauté française pour aider à la définition des charges critiques en polluants dans les milieux récepteurs et à l'établissement de normes pour les niveaux de concentration en éléments toxiques dans les déchets, les pollutions et les milieux récepteurs. Ces recherches doivent être menées sur la base de critères physico-chimiques, écotoxicologiques et sociaux-économiques, en associant notamment les industriels et les acteurs socio-économiques.

Les recherches sur le terrain devraient favoriser le développement de nouveaux capteurs in situ pour mesurer directement la concentration voire la spéciation des éléments dans les déchets et les milieux récepteurs ainsi que les conditions physico-chimiques environnantes sans perturbation, en s'appuyant notamment sur la mise en place de sites observatoires et de zones ateliers.

En ce qui concerne le transfert des éléments toxiques issus des déchets ou apportés directement par les rejets dans les milieux récepteurs, il faudra faire un effort de modélisation au niveau du couplage entre l'hydrodynamique d'une part et la bio-physico-chimie d'autre part, en s'appuyant notamment sur les données expérimentales et les données de terrain à différentes échelles spatiales (molécules-profil de sol- séquence de sols- paysage-bassin versant-région). Les matières organiques et les microorganismes jouent un rôle important dans la mobilité et le transfert des polluants organiques ou minéraux que ce soit dans les sols ou dans les eaux ; les recherches menées dans ce domaine devraient être renforcées et la

communauté concernée doit être mieux structurée. Ces recherches menées en partenariat avec l'ensemble des organismes de recherche (CEA, CIRAD, BRGM, ADEME, INERIS, etc) et intégrées dans les programmes européens (6^e PCRD) et internationaux, devraient permettre de faire des progrès considérables dans le domaine de la valorisation, du stockage et du traitement des déchets, mais aussi sur la biodégradabilité des composés toxiques et sur la rémédiation des milieux contaminés.

2.4 QUALITÉ DE L'AIR ET POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE

Un autre des grands enjeux de la société actuelle concerne les impacts de la pollution atmosphérique qui se manifeste à toutes les échelles spatiales et temporelles, des effets locaux aux effets globaux. L'activité anthropique a produit une augmentation significative des teneurs atmosphériques de certains gaz trace, comme le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes d'azotes ou les oxydes de soufre, des composés organiques persistants ou des métaux lourds, etc. Elle produit également des quantités importantes de particules d'aérosol, dont l'origine est essentiellement la condensation solide des gaz.

Ces émissions sont à l'origine des problèmes de pollution urbaine, qui se manifestent, par exemple, lors des pics de concentration d'ozone produit par la conjonction de facteurs chimiques (hautes teneurs d'hydrocarbures et d'oxyde d'azote), photochimiques et météorologiques (échanges verticaux limités dans l'atmosphère). On note, parmi ces polluants, de nombreuses substances nocives, dont une fraction non négligeable est de nature particulaire.

Ces polluants peuvent être transportés sur des distances importantes, et subir des transformations physiques et chimiques dans l'atmosphère, à la fois sous l'action de réactions en phases homogène et hétérogène (les nuages)

et du lessivage par les précipitations. Même à grande distance des sources, ces polluants sont susceptibles de perturber considérablement les écosystèmes (*Voir* l'exemple des pluies acides), de provoquer des dégâts sur les bâtiments ou les œuvres d'art mais aussi, et surtout, de poser des problèmes de santé publique.

Les conséquences des émissions polluantes se manifestent, à l'échelle globale, par une augmentation sans précédent, des gaz à effet de serre. L'augmentation de la température qui en résulte semble, dans certaines régions, limitée par la présence de teneurs importante en particules d'aérosol. Ils ont un effet « direct » en augmentant la partie réfléchi du rayonnement incident et un effet « indirect » en augmentant l'albédo des nuages. Globalement alors leur effet sur le climat est opposé à celui des gaz à effet de serre. L'existence de ces rétroactions positives ou négatives de la pollution sur le climat illustre la complexité du système climatique et les difficultés à quantifier les impacts des activités anthropiques.

2.5 CHANGEMENT CLIMATIQUE GLOBAL

Les scientifiques ont joué un rôle essentiel dans la prise de conscience générale du risque de modification climatique majeure forcée par la perturbation anthropique des concentrations atmosphériques de gaz radiativement actifs, tels que le CO₂ ou le CH₄. L'intérêt porté à ce risque s'est concrétisé au niveau international à la mise en place du GIEC, groupement de travail sur lequel s'est basé en partie la sphère politique pour définir les protocoles de Kyoto sur l'émission des gaz à effet de serre. Si le changement climatique causé par l'activité de l'homme est devenu à l'heure actuelle une réalité globalement acceptée, il n'en reste pas moins que la prévision et quantification précises de ce changement, les conséquences sur les climats régionaux, les impacts sur la société restent encore des points critiques,

dont les réponses sont encore balbutiantes, sur lesquels s'exercent une demande « sociétale » de plus en plus forte.

La communauté française a fortement contribué à l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement de la planète Terre et l'évolution de son climat. En s'appuyant aussi sur des données in situ et satellitaires, ainsi que sur des expériences ciblées, ces avancées se sont surtout appuyées sur la simulation numérique et l'analyse de données paléoclimatologies du quaternaire. Le couplage de modèles d'atmosphère, d'océan, de glace de mer, de cycles biogéochimiques, de surface continentales (hydrologie et cycles) ont ainsi permis par exemple d'effectuer en première internationale des simulations initiées en 1850 prenant en compte d'une manière interactive le cycle du carbone (biosphère continentale et océan). Au-delà du fait que cette simulation a montré un certain degré de réalisme pour l'évolution du xx^e siècle, elle a mise en évidence une complexité assez inattendue des rétroactions. Parmi d'autres résultats importants, on notera la forte sensibilité du climat à l'échelle régionale aux spécifications des rétroactions du climat sur la végétation.

Les priorités de la communauté dans les années à venir doivent se répartir entre l'observation et la modélisation. Il est absolument nécessaire de mettre en place des systèmes d'observation des parties lentes du système (océan profond, calottes glaciaires, etc.) tout en continuant de développer la couverture de la variabilité annuelle et décennale des réservoirs plus réactifs (atmosphère, océan de surface, glace de mer, etc.). Il est en outre fondamental de suivre les perturbations anthropiques de la composition de l'atmosphère (gaz à effet de serre, pouvoir oxydant, ozone, etc.). La place importante que tient la communauté et l'expertise qu'elle a acquise dans le champ des observations paléo-environnementales doivent être confortées, ces données étant particulièrement riches pour mieux contraindre et décrire la variabilité du climat à des échelles non directement observables : l'effort se portera entre autres sur les variations rapides, telles qu'elles ont été observées par

exemple dans les carottes de glace durant la dernière période glaciaire, et sur une meilleure définition des échelles temporelles pour être en mesure de quantifier les déphasages entre les différents océans et continents. Au-delà d'une amélioration de la représentation des processus clé dans ses modèles, objectif évident, les travaux en modélisation se focaliseront sur la compréhension de la dispersion des résultats des modèles, sur la description des rétroactions principales (qui pose aussi la question du changement éventuellement irréversible du climat et de l'existence de seuils), sur la détectabilité du changement climatique (ce qui demande d'effectuer un grand nombre de simulations numériques, point très dimensionnant vis-à-vis des moyens de calcul), sur la prévision des changements climatiques du *xxi*^e siècle (en réponse aux demandes des instances politiques dans le cadre des accords de Kyoto), sur les impacts régionaux du changement climatique globale (en liaison forte avec les demandes de la société). Ces questions ne peuvent être abordées sans être intégrées à un ensemble plus global, comprenant entre autres les sciences économiques et sociales. Enfin, elles demandent non seulement des collaborations avec des organismes fortement impliqués, comme Météo-France, l'IRD, le CEA, mais aussi une

coordination à l'échelle européenne (Hadley Centre, Max Planck Institut, etc.), dans le cadre du 6^e PCRD.

3 – CONCLUSION

L'opinion publique est de plus en plus demandeuse d'information de la part des scientifiques, en particulier sur les questions qui touchent à l'évolution des enveloppes superficielles de la Terre. Depuis une décennie, des efforts de communication (via les grands médias) ont été réalisés, en particulier dans le domaine de la pollution de l'air (ozone, pollution urbaine (campagne Escompte), etc.). Il va falloir encore améliorer le dialogue vers le grand public sur d'autres sujets majeurs (ressources en eau, pollutions des rivières, des côtes, inondations, réchauffement planétaire, etc.). De part les thématiques même abordées par la section 12, nous nous devons de participer massivement à cet effort. Mais il conviendra d'élargir cette préoccupation de communication accrue à ensemble du CNRS, car de très nombreux départements sont concernés (SDU, SDV, SHS, SC, etc.).

