

# Océan Atmosphère

2006 - 2011



**Bilan et prospective 2006 – 2011**  
**Exercice de la commission spécialisée océan-atmosphère**  
**de l'Institut national des sciences de l'Univers**

**Synthèse des ateliers préparatoires**  
**et du colloque de Lille**  
**21 – 23 novembre 2005**

**Sous la direction de**

Didier Tanré, Président de la CSOA

**Ont participé à la rédaction et l'édition**

Gérard Ancellet, François Baudin, Eric Brun, Martine De Angelis, Danièle Hauser, Herlé Mercier,  
Laurent Mémerly (Secrétaire de la CSOA), Nicole Papineau, Marie Alexandrine Sicre, Marc Trousselier, Michel Vauclin

**Avec la participation de**

Jean-Claude André, Gilles Bergametti, Stéphane Blain, Gilles Bœuf, François Carlotti, Hervé Claustre,  
Pascale Delecluse, Michel Desbois, Alain Dinet, Jean-Marie Flaud, Christian Georges, Francis Grousset,  
Daniel Guedalia, Catherine Jeandel, Patrick Mascart, Patrick Raimbault, Dominique Raynaud, Frédérique Rémy,  
Gilles Reverdin, Evelyne Richard, François Vial,

**Secrétaire de rédaction**

Christiane Grappin

**Remerciements à**

Lise Demagny et Catherine Fhima

Publié en mai 2007

# Sommaire

<b>Editorial</b> .....	p 4
<b>Résumé des conclusions</b> .....	p. 6
<b>Introduction générale</b> .....	p 8

---

## I Bilan

---

<b>Introduction</b> .....	p 14
<b>Grands projets nationaux</b> .....	p 15
<b>Actions internationales</b> .....	p 18
<b>Résultats majeurs des programmes nationaux</b> .....	p 24
<b>Applications opérationnelles</b> .....	p 27
<b>Conclusion</b> .....	p 29
<i>Programme atmosphère et océan multi-échelles</i> .....	p 30
<i>Programme national de chimie atmosphérique</i> .....	p 31
<i>Programme national en environnement côtier</i> .....	p 32
<i>Programme national d'étude de la dynamique du climat</i> .....	p 34
<i>Processus biogéochimiques dans l'océan et flux</i> .....	p 36
<i>Programme national de télédétection spatiale</i> .....	p 38

---

## II Prospective Priorités et orientations scientifiques

---

<i>Avant propos : « Quelle science en réponse à la demande sociétale ? »</i> .....	p 43
<b>Réduire les incertitudes sur la modélisation du Système Terre</b> .....	p 44
<b>Les interfaces</b> .....	p 48
<b>Impacts du changement global</b> .....	p 51
<b>Grands projets coordonnés</b> .....	p 56
<b>Prospective des milieux</b> .....	p 58

---

## III Organisation de la recherche

---

<b>Structuration de la recherche</b> .....	p 62
<b>Systèmes et moyens d'observation</b> .....	p 68
<b>Annexe 1 : Liste des navires</b> .....	p 81
<b>Annexe 2 : Liste des Services d'observation</b> .....	p 81
<b>Annexe 3 : Charte « Instrument national »</b> .....	p 82

---

## IV La communauté scientifique

---

<b>Ressources humaines</b> .....	p 84
<b>L'insertion de la communauté océan-atmosphère dans les universités</b> .....	p 93
<i>Liste des acronymes</i> .....	p 98

# Editorial

**C**onformément à sa mission, l'Insu organise régulièrement des prospectives scientifiques par domaine de recherche. Ce sont des temps forts pour la communauté concernée qui fait le bilan des actions entreprises les années précédentes, dégage les axes scientifiques majeurs des années à venir et définit les moyens dont elle a besoin pour les réaliser. La communauté océan-atmosphère regroupe les chercheurs, ingénieurs et techniciens qui travaillent à mieux comprendre le fonctionnement des enveloppes fluides de la Terre et du climat. Cette communauté, depuis toujours, cherche à faire progresser les connaissances du domaine comme à répondre aux demandes sociétales de plus en plus nombreuses, et effectuer le transfert des nouveaux acquis vers des applications opérationnelles. C'est ainsi que, dans le domaine, les premiers programmes nationaux de l'Insu ont été créés pour répondre aux besoins exprimés par les météorologues, ou ceux exprimés par les scientifiques impliqués dans les recherches menées autour de la destruction de la couche d'ozone.

Dans ce document, le bilan scientifique présenté concerne la période qui a suivi le dernier colloque de prospective de Brest en 2000, et en reprend les différentes thématiques, l'atmosphère, le climat et tous les aspects de l'océanographie, physique comme biologique. La constante de toutes ces recherches peut se résumer à vouloir comprendre ce qui signifie observer, analyser, modéliser. Afin d'y parvenir la communauté a besoin d'organiser de grandes campagnes de mesures et de réaliser des observations à long terme grâce aux services d'observations et aux satellites. Plusieurs projets ont été ainsi réalisés.

Un des projets phares est le programme Amma d'étude de la mousson africaine. Ce programme ambitieux qui doit se dérouler sur 10 ans au moins, a su mobiliser des physiciens, des chimistes, des biologistes, mais aussi des chercheurs des sciences humaines et sociales. Il faut aller encore plus loin et arriver à ce que chacun, avec des méthodes et des cultures de travail différentes, puisse se retrouver dans des projets définis en commun. Soulignons également le succès du transfert de connaissances vers les applications opérationnelles que cela soit en océanographie (Mercator-Océan) ou en ce qui concerne la qualité de l'air (Prev'Air) qui représente une première contribution importante au programme GMES, un des enjeux majeurs des prochaines années.

Il était donc essentiel d'effectuer un nouvel exercice de prospective afin de prendre en compte les évolutions survenues ces dernières années et définir les enjeux des dix années à venir. Cet exercice s'est déroulé sur une année et a commencé par des forums interactifs, des réunions de groupes de travail sur des sujets ciblés. Après une phase de réflexion et d'interaction avec l'ensemble des scientifiques, cet exercice s'est conclu par un colloque en novembre 2005 qui a réuni plus de 250 participants.

Dans ce cadre, la communauté océan-atmosphère s'est bien sûr attachée à définir les questions scientifiques auxquelles elle doit répondre, mais surtout comment elle doit encore mieux répondre aux demandes sociétales. Les mots clés peuvent se décliner en : intégration, modélisation du Système Terre ; processus ; mais aussi interfaces entre milieux océanique, atmosphérique et surface continentale, ou entre chercheurs et société, ou entre disciplines...

De plus, la communauté a toujours été très présente sur la scène internationale et de nombreux thèmes de recherche s'insèrent dans les grands programmes internationaux. Plusieurs projets initiés au niveau national sont maintenant soutenus par la commission européenne. Le colloque a permis de réfléchir à la manière d'intégrer cette dimension internationale et européenne. La prospective a également souligné la nécessité de mieux prendre en compte les intérêts régionaux. Elle a ainsi proposé une nouvelle organisation des programmes nationaux et émis d'autres recommandations présentées dans ce document.

Je souhaite insister sur les moyens dont a besoin la communauté pour réaliser ces objectifs. Cette science est une science d'observation. L'obtention des données nécessite des moyens lourds (flotte océanographique, avions, satellites, ballons...) et des services d'observations pérennes pour acquérir des séries longues de mesures. Ces recherches nécessitent aussi des moyens de calculs importants pour réaliser les simulations du Système Terre, développer des méthodes d'assimilation de données, constituer des bases de données. Mais elles ne peuvent s'effectuer sans des hommes et des femmes, chercheurs mais aussi personnels techniques et administratifs. Les prochaines années vont voir des départs massifs à la retraite s'opérer et ce séminaire a également permis d'identifier les futurs manques, les évolutions nécessaires dans les métiers et les embauches à venir.

Une des spécificités de ce domaine thématique est d'une part qu'il se compose des personnels de plusieurs organismes et d'autre part qu'il y a une coopération exemplaire entre le CNRS, Météo France, le Cnes, l'IRD, l'Ifremer pour ne citer que les organismes avec lesquels les relations sont les plus fortes. Ces organismes ont été associés à cette prospective de l'Insu qui est aussi la leur. L'Insu seul ne peut organiser, porter et réaliser les projets ; c'est grâce à cette coopération avec nos spécificités et nos différences que ces recherches ont pu, et pourront, être effectuées.

Je souhaite remercier la commission spécialisée océan-atmosphère de l'Insu, son président qui a organisé la discussion et la réflexion ainsi que tous ceux et toutes celles qui à des titres divers ont apporté leur contribution à cet exercice de prospective. Je souhaite également remercier tout particulièrement l'équipe qui a organisé le colloque, et réalisé ce document. Enfin, je souhaite au nom de tous dédier cet exercice de prospective aux deux acteurs majeurs de notre communauté qui nous ont quitté brusquement, Gérard Mégie et Christian Le Provost.

Que ce document soit un outil utile et qu'il permette à tous et à toutes de continuer à progresser dans leurs recherches, et aux organismes de mettre en œuvre ces objectifs ambitieux.

Nicole Papineau  
Directrice scientifique adjointe de la division océan-atmosphère de l'Insu 2004-2006

# Résumé des conclusions

**C**e résumé liste dans leurs grandes lignes les objectifs scientifiques identifiés dans le cadre de la prospective de l'Insu par la communauté océan-atmosphère, pour les cinq à dix années à venir ; il dresse l'inventaire des recommandations concernant les méthodes, moyens, outils existants ou non, qu'il s'agira de mettre en œuvre pour répondre aux questions posées et atteindre les objectifs visés<sup>1</sup>.

## Objectifs Scientifiques

Il s'agit principalement de :

- ▶ Améliorer la compréhension des phénomènes qui contrôlent la variabilité du climat, la circulation océanique et la réponse des écosystèmes aux changements climatiques ;
- ▶ Distinguer la variabilité interne naturelle de la variabilité forcée d'origine anthropique afin de réduire les incertitudes sur les évolutions futures ;
- ▶ Quantifier, voire modéliser les incertitudes et leur évolution ;
- ▶ Modéliser et comprendre les échanges de matière ou d'énergie associés aux interfaces entre les différents compartiments du « *Système Terre* » ;
- ▶ Estimer et prévoir les impacts environnementaux des changements globaux pour, entre autres, répondre aux demandes sociétales ;
- ▶ Améliorer la représentation des processus et hiérarchiser leur importance suivant les échelles.

## Méthodes

En ce qui concerne les méthodes, les priorités sont de :

- ▶ Favoriser les approches intégrées (observation-modélisation-assimilation) qui prennent en compte les mécanismes de couplage ;

- ▶ Renforcer les liens entre observations (*in situ* ou méso-échelle) et paramétrisation ;
- ▶ Démontrer la capacité des différents modèles à simuler un forçage observé ;
- ▶ Documenter les zones critiques sensibles aux événements extrêmes (la Méditerranée, les Pôles, les régions tropicales) ;
- ▶ Favoriser les approches expérimentales *in situ*, multiparamètres et multidisciplines - passer de la multidisciplinarité à l'interdisciplinarité ;
- ▶ Mettre en place des campagnes de mesures qui abordent un sujet dans sa globalité (comme Amma pour le cycle de l'eau) ;
- ▶ Encourager l'utilisation d'archives historiques et de proxies pour la détection du signal climatique et son évolution sur le dernier millénaire. Améliorer leur précision.

## Outils et moyens

En ce qui concerne les observations, les priorités sont de :

- ▶ Pour les vecteurs :
  - Étendre le champ d'action des avions existants (ATR et F20) grâce à un avion de type « C130 » dont le financement ne peut être qu'européen.
  - Renforcer la coordination entre les agences mettant en oeuvre des ballons et poursuivre la mise en place d'actions coordonnées au niveau européen.
  - Pour la flotte côtière, mettre à disposition rapidement un bateau estuarien polyvalent. Pour la flotte hauturière, analyser la remise à niveau du Marion-Dufresne II. Réfléchir, en inter-organismes, à la mise en place d'un navire intermédiaire entre les grands navires hauturiers et les navires côtiers. Avoir une politique d'accès aux bateaux plus favorable aux scientifiques.
  - Favoriser le développement et l'utilisation de nouveaux vecteurs automatisés (comme les drones ou les gliders).

<sup>1</sup> Les points ne sont pas classés par ordre d'importance.

- ▶ Maintenir les moyens financiers des Services d'observation labellisés existants. Poursuivre la politique d'attribution de postes Cnap. Mettre en place des mécanismes de contractualisation entre organismes.
- ▶ Développer la notion de site instrumenté (du fait du nombre important d'instruments qui y sont déployés ou de la spécificité géographique du site). Mettre en place une procédure de labellisation.
- ▶ Favoriser le développement et l'utilisation des satellites d'observation de la Terre. Assurer un suivi à long terme de paramètres climatiques ou environnementaux « clé ». Développer des instruments permettant l'accès à des paramètres nouveaux.
- ▶ Soutenir les pôles thématiques récemment créés autour, principalement, des données des missions spatiales. Développer et pérenniser les bases de données ; les rendre facilement accessibles à une large communauté.

**En ce qui concerne la modélisation, les priorités sont de :**

- ▶ Augmenter la puissance de calcul et les moyens de stockage des ordinateurs pour prendre en compte les améliorations actuelles des modèles : meilleure résolution spatiale, prise en compte de couplages de plus en plus complexes, simulation sur des périodes de temps de plus en plus longues, etc.
- ▶ Développer les techniques d'assimilation de données dans le but d'améliorer le réalisme des simulations, de mieux estimer la sensibilité des modèles, de mieux comprendre les limitations de prévision et comment les dépasser.

**En ce qui concerne l'instrumentation, les priorités sont de :**

- ▶ Développer une filière R&D permettant de combler le saut d'échelles et de complexité entre la mesure en laboratoire et l'observation *in situ*.
- ▶ Adapter toujours dans le cadre de la R&D les capteurs

existants aux différents vecteurs ; étudier leur automatisation et leur miniaturisation.

- ▶ Favoriser l'expérimentation en laboratoire qui permet de caractériser un nombre relativement limité de processus et d'étudier en profondeur leur comportement et interaction en réponses à différents forçages (de type mésocosme).
- ▶ Développer la notion d'« instrument national » (instrument coûteux et spécifique et/ou développé par un laboratoire) ou de parcs instrumentaux et faciliter leur mise à disposition auprès de la communauté.

**En ce qui concerne notre communauté scientifique, son devenir et son organisation, il s'agit de :**

- ▶ Mettre en place un programme unique de la commission spécialisée océan-atmosphère de l'Insu, géré en inter-organismes.
- ▶ Renforcer la coordination (et la circulation de l'information) entre les différents échelons (régional, national, européen et international) avec la mise en place d'un exécutif restreint.
- ▶ Adapter nos procédures comptables et administratives au contexte européen.
- ▶ Mettre en place un plan pluriannuel de recrutement afin d'anticiper les départs à la retraite (perte à l'horizon 2015, du quart des effectifs de l'ensemble de nos disciplines). Assurer la formation de chercheurs et d'ingénieurs dans les domaines identifiés comme les plus pénalisés (plus du tiers des départs concerne les sciences expérimentales).
- ▶ Dégager des moyens permettant une communication institutionnelle (communication de résultats scientifiques majeurs, annonce de grandes campagnes, diffusion de l'information vers les administrations, les associations ou les industriels, etc).

# Introduction générale

**L**a mission de notre communauté scientifique est d'étudier, comprendre et modéliser le fonctionnement de l'océan, de l'atmosphère, de leur couplage, et leur évolution à différentes échelles de temps et d'espace. Elle doit aussi proposer des réponses aux demandes sociétales, très fortes, concernant l'impact de l'activité humaine sur notre planète et plus particulièrement sur le changement climatique, la biodiversité, la composition chimique de l'atmosphère, la pollution, les ressources halieutiques, la gestion durable... Notre communauté est donc confrontée à un double défi :

■ **Répondre à des questions scientifiques qui exigent une forte inter-disciplinarité.**

■ **Parvenir à transférer dans le domaine opérationnel les savoir-faire acquis.**

Les enjeux scientifiques mis en avant lors de l'exercice de bilan et prospective de l'Insu en 2000 (colloque de Brest) étaient déclinés en cinq grands points :

■ **Améliorer les connaissances fondamentales sur certains processus clé encore mal quantifiés :**

- ▶ *Le rôle des nuages dans le système atmosphérique ;*
- ▶ *La contribution de l'océan à la variabilité climatique ;*
- ▶ *L'impact des petites et moyennes échelles sur la dynamique des fluides et le transport des traceurs ;*
- ▶ *Les fonctions biologiques des communautés auto et hétérotrophes ;*
- ▶ *Les flux de transformation de la matière par des mécanismes biologiques et chimiques dans l'atmosphère ;*
- ▶ *L'océan et les surfaces continentales.*

■ **Développer les études aux interfaces, en se focalisant sur les processus d'échanges et/ou de couplage**

**(interface troposphère – stratosphère, biosphère – hydrosphère, biosphère – atmosphère, océan – atmosphère, océan – sédiment, océan côtier – océan hauturier).**

■ **Décrire la variabilité du « Système Terre », entre autres aux basses fréquences, par l'intermédiaire des données satellitales et des services d'observation, dans le but en particulier de mieux séparer le signal naturel du signal transitoire anthropique.**

■ **Progresser dans la prévisibilité, que ce soit par l'intermédiaire d'études théoriques sur le comportement du système, ou par des techniques pertinentes d'assimilation de données.**

■ **Aller vers une meilleure représentation des impacts locaux des perturbations humaines (pollution régionale, écosystèmes côtiers), vers une prévision réaliste du climat et de l'environnement à l'échelle globale et régionale, passage privilégié et nécessaire vers la prévision opérationnelle et la demande sociale.**

Au cours de ces cinq dernières années, la communauté a mis en place des actions d'envergure qui ont contribué à apporter à ces questions des éléments de réponse qui sont détaillés dans la partie « Bilan ». Les enjeux ne sont pas remis en cause dans l'exercice de prospective actuelle, mais sont examinés sous une perspective différente, afin de prendre en compte les interrogations des citoyens notamment sur les risques naturels ou les impacts actuels et futurs des perturbations induites par les activités humaines. Trois axes de réflexion ont ainsi été dégagés :

### ■ Réduire les incertitudes sur la modélisation du « Système Terre »

Cet objectif est abordé sous trois angles : améliorer et consolider la représentation des processus, contraindre le système par un cadre intégrateur et une approche multi-échelles, quantifier les incertitudes. Les processus dont il faut améliorer la représentation concernent à la fois l'atmosphère, l'océan, les surfaces continentales ou encore la chimie homogène et hétérogène, etc. Ces questions se doivent d'intégrer les bases de données multi-modèles ou instrumentales, la calibration des proxies ou la reconstitution des forçages. Par ailleurs, l'assimilation de données quant à elle joue un rôle fondamental vis-à-vis de l'estimation des incertitudes dans la modélisation.

### ■ Les interfaces avec le rôle majeur des échanges dans les bilans d'énergie ou de masse, et les interactions entre les processus physiques, chimiques et les organismes vivants

Le premier objectif est d'améliorer la connaissance de l'hydrodynamique aux interfaces (couches limites, zones frontales, etc) et de son impact sur la biologie et la chimie de l'océan ou sur la formation des sédiments. Le second concerne les échanges de particules aux interfaces qui peuvent changer la composition chimique et /ou la biologie des milieux et contribuer au transport des éléments organiques et minéraux. Enfin, il est nécessaire de hiérarchiser l'importance des processus car leur impact peut être radicalement différent, ce qui conditionne le choix des paramétrisations utilisées dans les modèles selon les échelles spatio-temporelles considérées.

### ■ Les impacts du changement global

Notre communauté doit être capable d'identifier et de mesurer l'évolution des différents forçages d'origine climatique (température, rayonnement ultra-violet, concentration en gaz carbonique, etc) ou d'origine plus locales (nutriments, aménagements, etc), tout comme

les réponses des écosystèmes et de leurs composantes (physiques, chimiques, biologiques) à ces forçages. Les résultats de ces travaux dépendront en grande partie de notre capacité à mener des recherches interdisciplinaires.

A ces trois questionnements scientifiques ont été ajoutées deux réflexions plus structurelles :

### ■ Quelle science en réponse à la demande sociétale ?

La communauté scientifique est de plus en plus sollicitée par le citoyen ou les politiques pour répondre à leurs interrogations concernant les impacts environnementaux des activités humaines. Nous ne sommes pas toujours prêts à y répondre, soit parce que des travaux complémentaires que nous n'avons pas identifiés sont nécessaires, soit au contraire parce que ces questions considérées comme déjà résolues nécessitent une mise en œuvre opérationnelle plutôt du ressort d'autres instances. Comment la communauté peut-elle s'organiser pour répondre à ces demandes ? Quelques pistes de réflexion sont proposées suivant le type de demande et/ou le contexte, national ou international.

### ■ La structuration nationale et internationale

Si la communauté nationale est bien structurée, c'est en grande partie grâce aux programmes nationaux de l'Insu. Ils permettent en effet de regrouper l'ensemble des acteurs concernés (communauté scientifique, agences, ministères, etc), de définir ainsi conjointement les priorités et de mettre en place les moyens d'action nécessaires. Cette structuration n'a pour le moment pas d'équivalent au niveau européen. L'Insu et ses partenaires se doivent d'avoir une réflexion sur les liens entre programmes nationaux, européens et internationaux. Les réflexions ont également fait ressortir le besoin d'une part de modifier les contours de nos programmes et d'autre part de simplifier le fonctionnement actuel. Il

a été décidé de mettre en place un programme unique de la commission spécialisée océan-atmosphère de l'Insu, le programme LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement) décliné en plusieurs programmes plus thématiques.

Plusieurs projets focalisés sur des régions particulières ont été proposés :

### ■ La région Méditerranée

En effet, la région méditerranéenne constitue un lieu privilégié pour l'étude des interfaces avec des processus d'interaction complexes et où les impacts sont majeurs. Plus précisément, des questions scientifiques importantes se posent concernant : les processus aux interfaces océan/eau douce, couche limite océanique/couche limite atmosphérique, marges océaniques... ; la compréhension et la représentation des processus au sein de chacun des compartiments (processus de couche limite, nuages, convection...) ; la régionalisation climatique, l'impact des changements anthropiques et climatiques sur cette région très vulnérable. Parallèlement, la demande sociétale y est forte. Elle porte, par exemple, sur une meilleure identification des zones à risques comme les zones inondables, et un meilleur système de prévision avec alertes plus précises pour aider à la gestion des risques.

### ■ Les régions polaires

Les régions polaires arctiques ont depuis longtemps été un lieu privilégié d'études pour la communauté. Les objectifs des prochaines années portent par exemple sur l'évolution de la banquise arctique, le bilan des calottes polaires, l'ozone stratosphérique, la variabilité du climat récent. Ces études s'intègrent en particulier dans le cadre de l'année polaire internationale qui va se dérouler sur la période 2007-2009. Elles constituent donc plutôt un ensemble de propositions qu'un projet intégré avec une thématique scientifique structurante.

Néanmoins, la station Concordia dont les équipements scientifiques ont été financés par l'Insu constituera une priorité pour la communauté.

### ■ Les régions tropicales – cycle de l'eau

Dans les régions tropicales, le changement climatique global se traduit par des modifications des bilans d'énergie et d'eau importantes. Si la mousson africaine fait l'objet d'une étude approfondie au sein du projet Amma (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine), il faut étendre ce type d'études (sans nécessairement mettre en place une infrastructure d'une ampleur comparable) aux autres régions tropicales, qui sont par nature les lieux où les échanges énergétiques sont les plus importants. Dans ce contexte, les missions spatiales actuelles et futures apporteront des informations capitales dans l'étude du bilan radiatif et des éléments du cycle de l'eau (vapeur d'eau, nuages, précipitations).

Ces projets sont plus ou moins avancés et les échelles de temps de leur réalisation sont bien sûr différentes. Enfin, la mise en place d'un programme « Changement environnemental planétaire » ayant pour ambition de créer une dynamique entre les disciplines « océan-atmosphère » (OA), « surfaces et interfaces continentales » (SIC), « sciences du vivant » (SDV), « sciences humaines et sociales » (SHS) pour aborder des questions sur la dynamique des gaz à effet de serre, des ressources en eau, des ressources alimentaires, concernant la santé et la distribution des risques, nécessite une réelle intégration/réflexion avec d'autres communautés. Les discussions sont actuellement en cours.

Les progrès dans nos domaines scientifiques dépendent de façon capitale de nos systèmes et moyens d'observations (observations au sens large : plates-formes, instruments, réseaux), moyens de calculs, mesures en laboratoire, etc. Ces moyens d'observations

font appel à un système d'organisation et d'évaluation spécifique inter-organismes et demandent un soutien très important de la part des organismes qui en sont responsables (Ifremer, Ipev, Météo France, CNRS, Cnes, etc.). Leur maintien et leur évaluation est un enjeu fondamental pour notre communauté. Un état des lieux a été dressé et des recommandations sur les moyens à mettre en œuvre dans les cinq ans à venir, ou à plus long terme, ont été exprimées.

Par ailleurs, notre communauté scientifique va affronter dans les années qui viennent le départ de nombreux ITA et chercheurs. Ces départs, s'ils ne sont pas anticipés, auront des conséquences importantes sur nos activités de recherche. Nos thématiques ont évolué rapidement et il est également nécessaire de prendre en compte les besoins nouveaux. L'analyse des effectifs et de leur évolution prévisionnelle a été menée, elle doit permettre de mettre en place un plan pluriannuel de recrutement. A ce titre, la formation de nouveaux chercheurs et ingénieurs est cruciale. Notre domaine de recherches, relativement nouveau, n'est

implanté que dans un nombre limité d'universités. Il faut veiller à lui donner une bonne visibilité, en continuant à développer et soutenir des enseignements dans les masters identifiant clairement les thématiques "océan-atmosphère" dans leur mention ou parcours, et à s'insérer dans des écoles doctorales qui affichent également, clairement, cette identité.

Enfin, la communication des résultats de la recherche, est une mission essentielle de l'Institut. Il appartient, individuellement, aux chercheurs de répondre aux demandes directes d'information ou de communication. De même, il est du rôle du chercheur de fournir aussi régulièrement que nécessaire les informations scientifiques permettant à l'Institut d'assurer une communication des résultats de la recherche. A l'inverse, la communication institutionnelle (répercuter un résultat scientifique majeur, annoncer une grande campagne, diffuser de l'information vers les administrations, les associations ou les industriels, préparer des dossiers de presse...) relève nécessairement de l'Institut avec des moyens adaptés.



Escompte

Pomme

Map

Amma

Concordia

Prév'Air

Mercator

I  
Bilan

## *Introduction*

Les programmes nationaux, associés aux moyens de l'Insu, ont permis la mise en place de projets ambitieux comme Fastex, Map, Pomme, Escompte, Amma... Ces actions d'envergure, caractérisées par une problématique scientifique bien ciblée, ont demandé une approche multi-disciplinaire nécessitant une composante d'observation et d'expérimentation lourde, associant le plus souvent un volet de modélisation numérique très conséquent. Elles ont exploré et relié des échelles de temps et d'espace très variées, de la seconde/minute aux millénaires, de la cellule au globe terrestre. Par leur ampleur, certaines ont nécessité une programmation pluri-annuelle et la collaboration de plusieurs organismes de recherche nationaux. Enfin, la plupart se sont intégrées dans des actions internationales, en particulier européennes, dans lesquelles la communauté française a pu avoir une position prépondérante.

Afin d'éviter une revue exhaustive de l'ensemble des actions soutenues au cours de ces dernières années, nous avons pour chaque catégorie, retenu les projets les plus représentatifs des orientations scientifiques et illustrant l'adéquation des moyens mis à la disposition de la communauté.

## Grands projets nationaux

**L**es trois projets sélectionnés sont organisés autour d'une ou plusieurs campagnes ambitieuses d'observation sur le terrain afin d'illustrer l'intérêt d'une programmation pluri-annuelle et de la nécessaire collaboration des organismes de recherche nationaux.

### Escompte

Soutenue par le Ministère de l'environnement et du développement durable (MEDD) et par différents établissements publics, Ademe, Cnes, Cnrs/Insu, Météo France et la région Paca, la campagne Escompte (Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions) s'est déroulée en juin et juillet 2001 dans la région de Berre-Marseille. Cette opération a eu pour cadre plusieurs programmes nationaux dont le Programme national de chimie de l'atmosphère (PNCA-Insu) et le Programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale (Primequal-MEDD).

■ De nombreux instruments (au sol, en avion et sous ballon) ont été déployés par plusieurs laboratoires français et étrangers complétant les observations des associations de surveillance de la qualité de l'air (Airmarex et Airfobed). Un total d'environ 120 scientifiques a participé à cette campagne. Parmi les principaux résultats, on peut noter la production d'une base de données détaillée des émissions de polluants primaires, de la composition et de la dynamique de l'atmosphère lors d'épisodes de pollution photochimique.

■ La base de données, hébergée par Medias-France ainsi constituée, sert de référence pour qualifier les modèles de pollution atmosphérique travaillant aux échelles locale et régionale, et contribuer à leur amélioration. Elle permet de réaliser des études de processus mis en jeu dans la pollution urbaine et périurbaine comme par exemple :

- ▶ Le rôle essentiel des conditions météorologiques sur la pollution due aux particules avec formation, abondante à la source ; pollution accentuée par le transport de particules secondaires issues de la dégradation des composés organiques volatils anthropiques et biogéniques.
- ▶ Le questionnement sur les vitesses de production d'ozone, calculées à partir du bilan radicalaire, qui sont élevées mais ne produisent pas de pics de pollution importants ; ce qui pourrait indiquer des puits non encore identifiés.
- ▶ La validation des modèles physico-chimiques de pollution atmosphérique.

### Risques de crues-éclair en région Cévennes–Vivarais

Le soutien conjoint du « Programme atmosphère-océan à multi-échelles – Programme national de recherche en hydrologie » (Patom-PNRH) a conduit à l'élaboration d'une opération pilote centrée sur l'étude des phénomènes de crues éclair en s'appuyant sur l'observatoire de recherche en environnement OHM-CV (Observatoire hydro-météorologique méditerranéen Cévennes-Vivarais), labellisé ORE (Observatoire de recherche en environnement) en 2002. Ce projet a également bénéficié du soutien de l'Action concertée incitative (ACI) « Prévention des catastrophes naturelles » et l'ACI « Aléas et changements globaux » et de plusieurs projets européens. Son caractère pluridisciplinaire, par les domaines scientifiques abordés ainsi que par les méthodes d'investigation employées (observation et modélisation), a permis de créer une réelle synergie nationale autour des questions scientifiques liées à la compréhension des processus hydrométéorologiques associés à ces situations extrêmes.

■ L'observation hydrométéorologique s'appuie sur des démarches complémentaires :

- ▶ La valorisation et l'amélioration du système d'observation radar opérationnelle. Ces actions ont été menées par le Direction des Systèmes d'observation de Météo France et le LTHE mettant ainsi à profit leurs complémentarités scientifiques et techniques.
- ▶ La valorisation météorologique des champs de vapeur d'eau troposphérique obtenus par l'observation GPS.
- ▶ Le développement d'algorithmes et l'installation d'un prototype d'hydrométrie par vidéo numérique (hauteurs d'eau et vitesses de surface).
- ▶ La mise en place d'un retour d'expérience approfondi de l'épisode du 8 et 9 septembre 2002 associant les Sciences de l'Univers et les Sciences Humaines et Sociales.

■ La modélisation hydrométéorologique a été menée en 3 étapes :

- ▶ Les modélisations atmosphériques de méso échelle (quelques dizaines de km) des situations de précipitations intenses (octobre 1995, octobre 2001, septembre 2002) ont été réalisées et validées. L'importance de l'assimilation de données à méso échelle a été mise en évidence par l'amélioration de la prévision de l'événement des 8 et 9 septembre 2002. Ceci conforte les résultats acquis par le passé sur d'autres situations moins forcées à l'échelle synoptique.

► L'identification des échelles hydrométéorologiques pertinentes pour la compréhension des crues rapides a été abordée par la modélisation qui permet d'analyser la signature hydrologique des épisodes pluvieux pour l'ensemble des bassins versants de la région (250 à 2500 km<sup>2</sup>).

► La mise en place du couplage atmosphère-hydrologie.

### **Pomme (Programme océan multidisciplinaire méso échelle)**

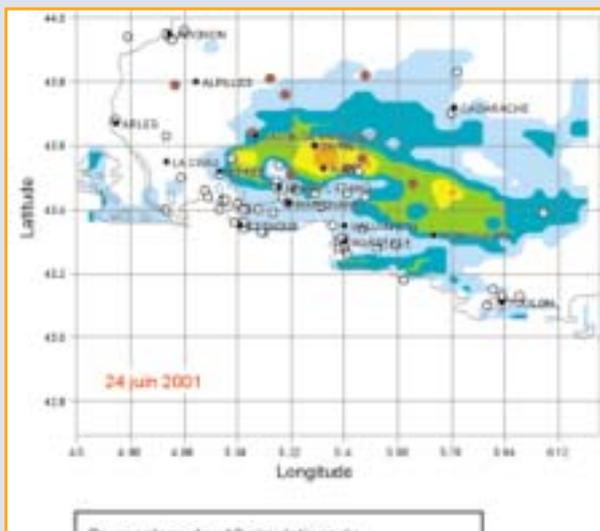
Soutenu par le CNRS/Insu, le Shom, l'Ifremer et Météo France dans le cadre des programmes Patom et Proof (Processus biochimique dans l'océan et flux), le programme Pomme a eu pour objectifs principaux : de comprendre le rôle de la méso échelle sur les processus de la subduction des eaux modales et la floraison printanière ; de déterminer les processus régulant les caractéristiques physiques et biogéochimiques des masses d'eau modales et le devenir de la matière biogène subductée et exportée à l'échelle annuelle. La zone d'étude se trouve dans l'Atlantique nord-est à mi-chemin entre les Açores et la péninsule Ibérique (38°N - 45°N).

■ La stratégie du projet s'est appuyée avant tout sur l'observation *in situ* du cycle annuel (octobre 2000 – octobre 2001) lors de plusieurs campagnes pluridisciplinaires à bord de deux navires et sur la simulation numérique de la circulation océanique et des traceurs biogéochimiques. L'analyse de données en temps quasi réel, associée à des études d'assimilation de données dans des modèles pronostiques, a joué un rôle important pour

contraindre la stratégie d'échantillonnage spatial lors d'études de processus à petite échelle.

■ POMME a permis de préciser la variabilité saisonnière océanique tant physique que biogéochimique dans les couches supérieures de l'océan pour une région typique des latitudes tempérées au large de l'Europe du Sud. On a pu noter la présence dans des situations très peu stratifiées d'hiver (couche mélangée profonde) d'une communauté phyto-planctonique abondante, quoique assez peu productive. Les situations de production planctonique importante lors de la restratification printanière étaient associées à des organismes plutôt de taille moyenne que de grande taille et étaient réparties sur une durée assez longue, suggérant des rôles importants joués par les boucles microbiennes et par la pression de broutage du zoo-plancton sur la distribution des communautés phyto-planctoniques. Enfin, les échelles spatiales impliquées dans les échanges entre couche de surface et thermocline au printemps, ainsi que dans les distributions spatiales du plancton, se sont avérées être tant la grande échelle, que celle de quelques tourbillons ou structures dynamiques majeurs, et peut-être plus encore de structures à échelles plus fines (qq km), en tout cas lors des situations stratifiées au printemps.

■ Cette campagne a donné lieu à un numéro spécial dans le Journal of Geophysical Research – Oceans en Juillet 2005 avec plus d'une vingtaine d'articles. La communauté est maintenant fortement impliquée dans la synthèse finale, à la fois en analysant le jeu de données très complet recueilli sur le terrain (une base de données a été créée), et en utilisant des outils de simulation numérique, couplée dynamique-biogéochimie, à très haute résolution (quelques kilomètres).

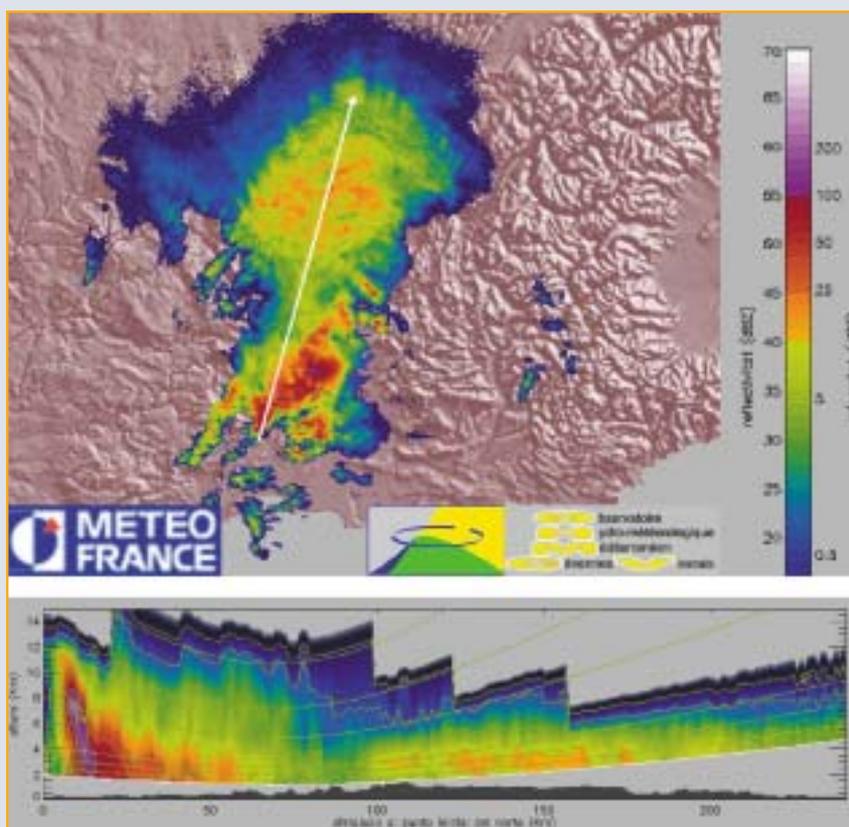


*Pourcentage, sur le domaine Escompte, de modèles qui prévoient le dépassement du seuil légal d'information relatif à l'ozone (180 microgrammes.m-3) sous forme d'isolignes colorées à partir de 10% (au moins 2 modèles). Des ronds rouges (ou blancs) marquent les sites où ce dépassement a été observé (ou non). La surface au-delà de 10% est un assez bon indicateur du risque (ou de l'absence de risque) de dépassement de ce seuil très important pour les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air. Source Ecompte.*



*Bouée Marisonde. Deuxième campagne océanographique (Pomme 1-2001) du programme Pomme entre les Açores et la péninsule Ibérique. L'objectif de cette campagne était de suivre le réchauffement des couches de surface et les différentes étapes de production de biomasse et son impact sur le bilan de carbone dans l'océan.*

© CNRS Photothèque/RIMMELIN Peggy, FERNANDEZ Camila



*Système convectif de méso échelle observé le 9 septembre 2002 à 0200 UTC dans le Gard à l'aide du radar météorologique de Bollène (réseau Aramis de Météo France) exploité en mode volumique. (source : OHM-CV)*

## Actions internationales

Que ce soit par le biais d'expériences de terrain, de mesures en laboratoire, de réseaux de surveillance, de services ou de sites d'observation, ou par la modélisation climatique, la dynamique impulsée par les actions soutenues par l'Insu a permis à la communauté française « océan-atmosphère » soit d'ouvrir les programmes initialement nationaux à la collaboration internationale tout en gardant la maîtrise des projets, soit d'être à l'initiative de projets européens en tant que leaders.

### Map

Le programme Map (Mesoscale alpine programme) visait à améliorer la connaissance et la prévision des précipitations et de la circulation atmosphérique au voisinage d'une chaîne montagneuse, thèmes internationalement reconnus comme prioritaires, en particulier par l'OMM.

■ Initié par Météo-Suisse, Map a rapidement mobilisé la communauté des pays alpins, tant les services météorologiques que les agences scientifiques. Le soutien immédiat et significatif du Patom s'est avéré déterminant pour convaincre d'autres partenaires (Canada, Etats-Unis, Grande-Bretagne) d'apporter une importante participation. Map a donné lieu à l'automne 1999 à une vaste campagne expérimentale conduite sur l'ensemble du massif alpin sous un co-leadership franco-américain. Au total, ce sont 14 pays et environ 200 chercheurs et collaborateurs techniques qui se sont mobilisés durant plusieurs années pour réaliser les objectifs de ce programme.

■ Map a permis de recueillir une documentation sans précédent des écoulements alpins et de mettre en évidence leur profonde et complexe altération par l'orographie. La distribution spatio-temporelle des précipitations a pu être analysée. Map fut par ailleurs l'occasion de tester les nouveaux modèles numériques, fondés sur un formalisme non hydrostatique qui préfigurent la nouvelle génération des modèles de prévision du temps. Il est maintenant avéré que les modèles de résolution kilométrique apportent un gain de prévisibilité, tant pour les épisodes de foehn que pour les précipitations intenses.

### Scout-03 (Stratospheric climate links with emphasis on the upper troposphere and lower stratosphere)

Des efforts importants ont été déployés dans les années 1990 par l'Union Européenne pour fédérer la communauté scientifique en organisant de grandes campagnes (EASOE (European arctic stratospheric ozone experiment), Theseo (Third european stratospheric experiment on ozone) ...) afin d'étudier les processus entrant en jeu dans la formation du trou d'ozone. Grâce, en particulier, à la spécificité des activités ballons du Cnes et aux avions de recherches atmosphériques, la communauté française a pu se structurer et jouer un rôle majeur dans les campagnes. Cela lui a permis d'être le leader d'un projet tel qu'Hibiscus-Troccinox qui, entre autres résultats, a mis en évidence la grande variabilité des concentrations d'ozone et de dioxyde d'azote dans la zone de transition entre troposphère et stratosphère (de 14 à 20 km) dans les régions tropicales. Ainsi, le maximum marqué d'oxydes d'azote (NOx) sur l'Amérique du Sud et sa décroissance rapide sur le Pacifique semblent s'expliquer par une combinaison du transport horizontal entre troposphère et stratosphère, et par la présence d'une source locale associée à la convection (orages). Cette structuration a également permis à la communauté de prendre une place prépondérante dans le projet Scout du 6<sup>ème</sup> PCRD. Elle est, entre autres actions de Scout, particulièrement impliquée dans la campagne d'étude de la haute troposphère et de la basse stratosphère qui s'est déroulée en Afrique, en synergie avec la campagne Amma.

### Introp (Interdisciplinary tropospheric research)

Cette action, dont la conduite est assurée par la France, dans le cadre de l'European Science Foundation, regroupe à la fois des études en laboratoire, des campagnes de mesures mais aussi la modélisation atmosphérique afin d'apporter les éléments nécessaires à la compréhension de

phénomènes atmosphériques liés à la qualité de l'air et au climat. Introp favorise en particulier sur des questions clés (oxydation de polluants, physico-chimie des aérosols) les échanges d'informations et de personnels, mais aussi l'organisation de réunions d'experts à l'échelle européenne. En cela, Introp stimule une réponse communautaire en particulier sur l'ensemble des actions liées aux études en laboratoire et maintien du développement des connaissances de base (processus chimiques et physico-chimiques) indispensables au développement futur d'outils de simulation opérationnels. Cette action Introp favorise donc une structuration des équipes françaises et européennes.

## Mersea (Marine environment and security for the european area)

La France a la responsabilité du projet Européen Mersea du 6<sup>ème</sup> PCRD pour le développement d'un système préopérationnel de surveillance et de prévision des courants, des cycles biogéochimiques et des écosystèmes océaniques de l'échelle globale à l'échelle régionale et pour des pas de temps allant de la journée à quelques mois. Le projet, démarré en 2004, est placé sous la coordination de l'Ifremer, le CNRS pilotant le volet recherche et avec un rôle important du Groupement d'intérêt public (GIP) Mercator-Océan. Au cœur du système, la synthèse d'information via l'assimilation des données spatiales et *in situ* dans des modèles d'océan permet l'analyse, la prévision et la définition de produits et de services en réponse aux demandes des clients essentiellement institutionnels. Le modèle global à très haute résolution, actuellement développé par le GIP Mercator-Océan, sera complété par un ensemble coordonné de systèmes régionaux fournissant un contexte à la prévision en milieu côtier. Ce système intégré a vocation à devenir la composante océanique de GMES (Global monitoring for environment and security).

## Eur-Océans

Grâce au rôle structurant des programmes de l'Insu en biogéochimie marine, la communauté française a rapidement eu une excellente visibilité internationale, en particulier dans le cadre d'actions importantes sur le terrain (campagnes océanographiques du programme international Joint global ocean flux studies (Jgofs)). Les relations entre plusieurs champs d'expertise (modélisation, observation, expérimentation, chimie,

biologie) ont rapidement permis de mettre sur pied des actions intégrées et ambitieuses, en particulier dans l'Océan Austral et dans les régions oligotrophes de l'océan mondial. Elles se sont concrétisées dans le cadre de projets européens, et elles ont donné lieu à la mise en place du réseau d'excellence Eur-Océans du 6ème PCRD, dont le leadership est français (Brest, Villefranche/mer). Ce réseau fait le lien entre la biogéochimie marine (cycle du carbone et des éléments majeurs), l'écologie (fonctionnement des écosystèmes marins), et les ressources halieutiques. Cette interdisciplinarité et intégration reflètent l'état de la communauté française, assez mature pour engager ce type de couplage complexe, en particulier par l'intermédiaire de la modélisation, point ayant été soutenu par Proof et ses prédécesseurs (JGOFS – France, Programme flux océanique (PFO)).

## Amma (Analyses multi-disciplinaires de la mousson africaine)

L'étude de la variabilité inter-annuelle et inter-décennale de la mousson en Afrique de l'Ouest a suscité des efforts de recherche importants dans les années récentes. Superposées à ce signal, les variations inter-annuelles marquées des décennies récentes ont eu pour conséquence des années extrêmement sèches, aggravant l'impact environnemental et socio-économique du déficit d'ensemble. Une telle variabilité soulève des questions essentielles pour le développement durable de toute la région.

■ Afin d'y répondre, la communauté soutenue par les organismes a ainsi mis en place un ambitieux programme trans-disciplinaire et multi-échelles avec deux objectifs majeurs :

- ▶ Améliorer notre compréhension de la mousson africaine de l'Ouest et de son influence sur l'environnement physique, chimique et biosphérique aux échelles régionale et globale ;
- ▶ Relier la variabilité du climat aux impacts sur la santé humaine, les ressources en eau et la sécurité alimentaire pour les nations d'Afrique de l'Ouest, et définir les stratégies de surveillance appropriées.

■ Pour atteindre ces objectifs, Amma met en oeuvre une approche combinant observations spatiales, aéroportées et *in situ*, analyse de données et modélisation numérique sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles. Amma est un programme international qui regroupe des chercheurs de disciplines aussi diverses que la météorologie, la climatologie, l'océanographie, la chimie de l'atmosphère, l'hydrologie, l'hydrogéophysique, l'écologie végétale, l'alimentation ou la santé.

■ D'un point de vue structurel, les organismes concernés (CNRS/Insu, Cnes, Ifremer, IRD, Météo France) ont mis en place un mécanisme spécifique et original, dénommé API (Action Programmée Interorganismes), destiné à assurer la cohérence de l'ensemble des contributions, en concertation avec les programmes nationaux, et à formuler des recommandations aux chercheurs et financeurs. Amma est également soutenu par l'Europe en tant que projet Intégré du 6ième Programme, sous coordination CNRS, avec de fortes participations américaines, allemandes, britanniques et italiennes.

### Système climatique

La compréhension du fonctionnement climatique du Système Terre repose sur l'utilisation des techniques de modélisation numérique et, en s'appuyant sur un historique fort, les chercheurs ont réussi à intégrer leurs efforts dans le cadre de collaborations nationales et européennes (projets Enes, Ensemble, ...).

■ En particulier, autour du code océanique OPA et de la réflexion stratégique européenne Prism pour faire évoluer les architectures logicielles des modules impliqués, une stratégie scientifique commune avec la réalisation d'un ensemble de scénarii a permis la participation des équipes françaises au GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement du climat). Ces simulations prennent en compte plusieurs hypothèses contrastées sur l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre, ainsi que sur l'évolution des aérosols sulfatés. Les sorties de ces simulations ont été formatées et mises à la disposition de la communauté scientifique.

■ Les modèles en jeu ont fait l'objet de modifications importantes par rapport aux versions précédentes afin d'améliorer le comportement physique du système (comme la nouvelle paramétrisation de la convection nuageuse dans le modèle de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)) et pour mieux représenter le cycle d'éléments importants du système climatique (eau, carbone).

■ Un autre aspect important de ces recherches concerne la régionalisation. Un effort a été fait pour prendre en compte l'histoire et l'hétérogénéité des sols, des cultures ou des couverts végétaux dans la maille d'un modèle global. L'utilisation de maillage étiré a permis de mieux cerner la variabilité sur l'Europe, un modèle régional couplé sur la Méditerranée a été développé pour aborder des questions critiques de couplage hydrologie/climat autour de ce bassin.

### Projets paléo-climat

La communauté française travaillant sur la dynamique naturelle du climat agit comme un moteur puissant pour l'élaboration de programmes européens dans le domaine ("250 kyr", Epica, Pole-Ocean-Pole, Epica-MIS, projets Euroclimate de l'ESF). Elle a probablement été une des premières à réunir expérimentateurs et modélisateurs pour comprendre les processus mis en jeu et aider à l'amélioration des modèles climatiques. Ce leadership doit beaucoup à la structuration nationale, en particulier aux programmes nationaux PNEDC (Programme national d'étude de la dynamique du climat) et Eclipse (Environnement et climat du passé : histoire et évolution), qui a créé les conditions nécessaires au décloisonnement des disciplines (glaciologie, océanographie, surfaces continentales, modélisation).

■ Dans ce cadre, les périodes interglaciaires sont des laboratoires irremplaçables pour étudier les fluctuations climatiques dans un monde chaud et la France a joué un rôle moteur dans l'acquisition des données glaciologiques. Le forage EPICA (European project for ice coring in Antarctica) Dôme C s'est achevé en décembre 2004 à une profondeur de 3270 m et l'âge atteint est d'au moins 800 000 ans. La couverture de huit interglaciaires ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude de ces périodes chaudes.

### Concordia

A la suite d'un accord de coopération signé en 1993, la station antarctique Concordia a été installée conjointement par l'Italie (PNRA) et la France (IPEV) au dôme C, sur le site du forage EPICA. Avec la station Admunssen-Scott au pôle sud, c'est la seule station, maintenant permanente, située sur le plateau antarctique. Les caractéristiques de ce site isolé et éloigné des autres stations, à une altitude élevée, reposant sur une épaisse couche de glace et à l'intérieur du vortex polaire, en font le lieu privilégié de six grands axes de recherche (allant de la médecine à l'astrophysique en passant par la glaciologie et les sciences de l'atmosphère) retenus par le programme Concordia. Pour accompagner les études portant sur la glaciologie, la chimie de la troposphère et la stratosphère polaire, un effort important de l'Insu a été consacré à l'équipement de cette station.

## Euro-Climat (action ESF)

Dans le cadre des actions Eurocore de l'ESF, un appel d'offre a été lancé sur les paléoclimats et la communauté s'est largement mobilisée pour y répondre. Tout d'abord, de nombreuses équipes françaises ont souvent fait partie de projets sélectionnés, parfois même en tant que Principal Investigator, ce qui souligne la reconnaissance de leur expertise et de leur bonne intégration dans le réseau européen. La sélection des propositions a montré le dynamisme scientifique de la communauté sur des thèmes nouveaux par rapport aux programmes nationaux existants. Par contre, c'est sans doute un point qui incite à réfléchir sur notre mode de soutien à la recherche, la disparité des mécanismes qui abondent un même projet rend le soutien français difficile à mettre en œuvre.

## Les Services d'observation

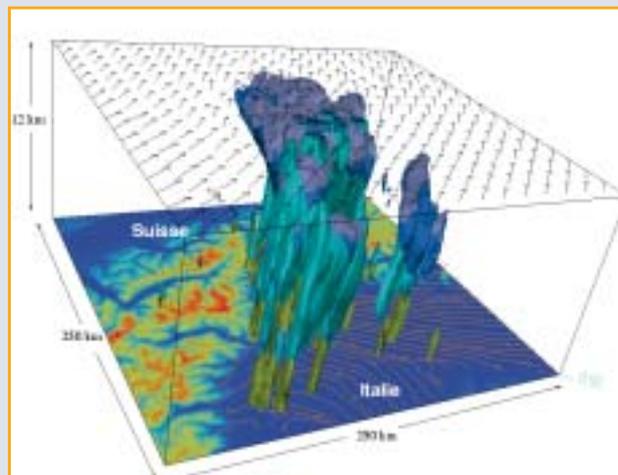
La plupart des Services d'observations (SO) contribuent de façon importante à des réseaux internationaux. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous citerons quelques exemples. Le SO-IDAF (Igac/Débit/afrique) participe à la mesure de l'évolution à long terme des concentrations atmosphériques des gaz et des aérosols dans l'air et des précipitations pour quantifier les dépôts atmosphériques secs et humides. Le SO-Mozaic (Measurement of ozone, water vapour, carbon monoxide and nitrogen oxides by Airbus in-service aircraft) contribue aux mesures d'ozone et de vapeur d'eau dans la troposphère libre à partir d'avions de ligne. C'est un consortium européen original et exemplaire avec un partenariat avec Airbus qui est soutenu depuis sa création par des projets européens. Pour l'océan, le SO-Rosame, qui participe au suivi à long terme du niveau moyen des mers en maintenant des marégraphes dans les régions australes, est une contribution au réseau international Gloss (Global sea level observing system).



**Préparation d'une montgolfière infra rouge lors de la campagne Hibiscus d'étude des composés de l'ozone et de l'azote dans la troposphère et l'atmosphère des régions tropicales.**  
© Service aéronomie CNRS/IPSL

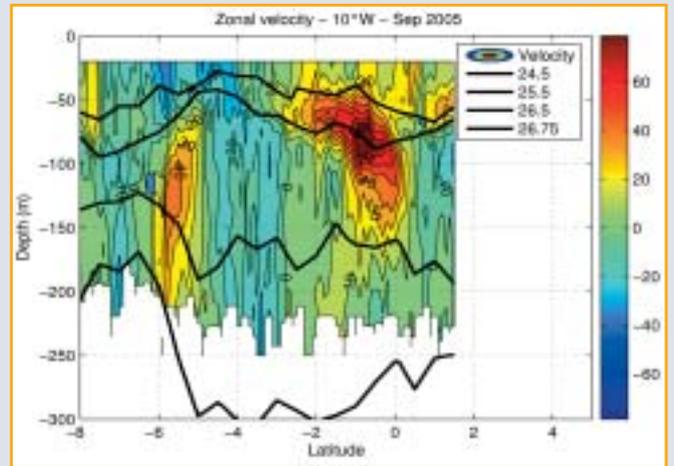
**Simulation par le modèle Méso-NH à haute résolution spatiale de la ligne de grains observée le 17 Septembre 1999, lors de la campagne MAP. La ligne orageuse est matérialisée par les isovolumes des hydrométéores glacés en bleu et liquides en brun.**

**Les lignes de courant en surface révèlent la convergence en basses couches des flux en provenance de la mer Ligure d'une part et de la mer Adriatique d'autre part. MAP**  
© Laboratoire d'Aérodynamique - CNRS - OMP

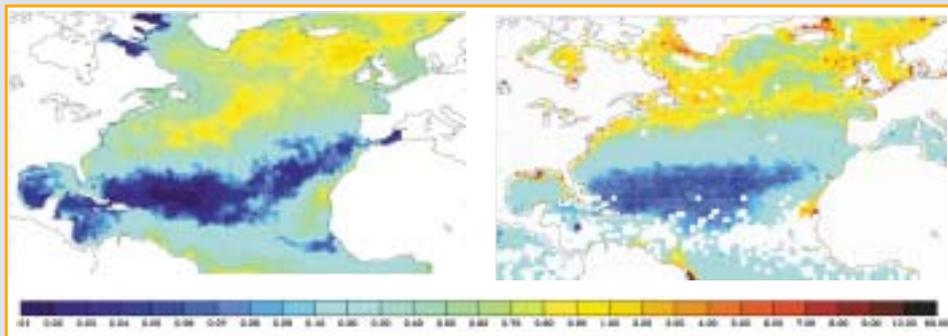




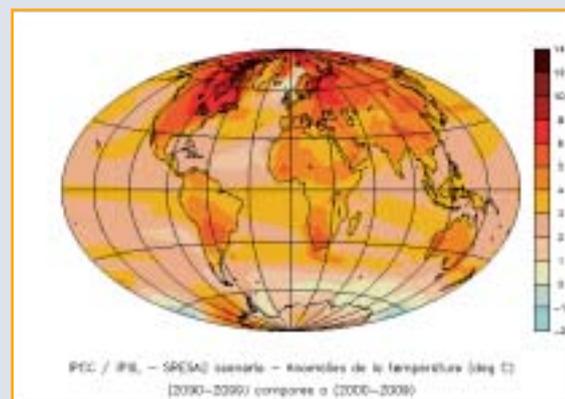
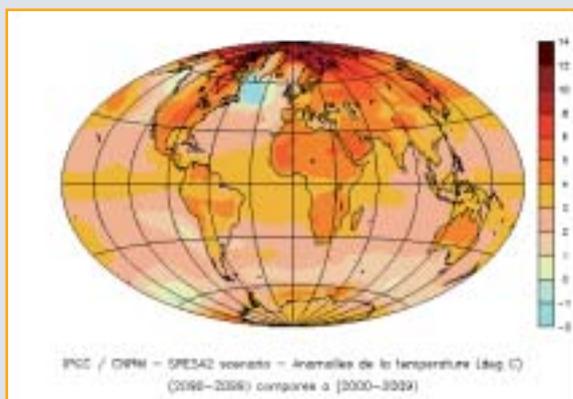
**Amma, site de prélèvements et d'analyse des aérosols mis en œuvre par le Lisa près de Niamey (Niger)  
© Amma - cnrs.**



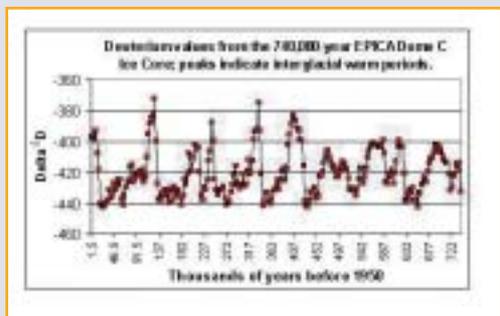
**Section verticale du courant zonal (en jaune/rouge, courant vers l'Est) à 10°W montrant le sous courant équatorial très intense vers 100m de profondeur en septembre 2005.  
© Programme Egee Amma.**



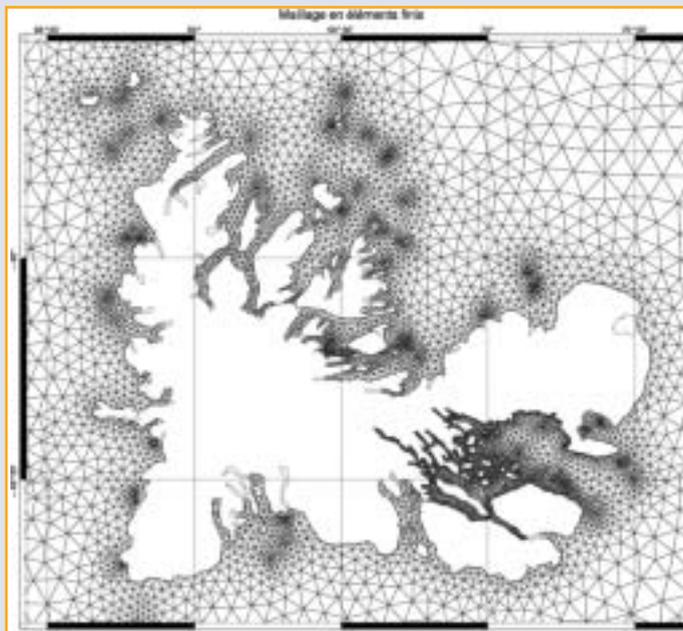
**Distribution superficielle de chlorophylle a (en mg/m<sup>3</sup>) caractéristique du mois de juin 1998, simulée par le modèle d'écosystème P3ZD, couplé au modèle de circulation OPA/NATL3 contraint par assimilation de données d'altimétrie et de température de surface. La mise au point de ces simulations au LEGI a permis d'initier une expérience de démonstration avec le système Mercator en temps légèrement différé dans le cadre du projet BIONUTS/MERSEA.**



**Anomalies de température (deg C) pour la période 2090-2099 comparées à 2002-009 (scénario A2) produites par les modèles de l'IPSL et du CNRM. © IPSL/CNRS/Cea, CNRM/Méto France.**



**Reconstitution de la concentration en deutérium des 740 000 ans (forage Epica Dôme C). Les pics indiquent les périodes interglaciaires chaudes. © LGGE-LSCE-CRNS-CEA**



**Maillage en éléments fins pour la modélisation des marées, utilisé par le service d'observation Rosame. © Legos/CNRS/Cnes**



**Station Concordia © IPEV**



**Station Summit, Groenland Central (National Science Foundation). Une section de carotte est ramenée à la surface lors du forage 100 mètres. Etude de la fonction de transfert du mercure gazeux de l'atmosphère à la transition névé-glace. Détermination de la composition atmosphérique passée en mercure gazeux sur les 30 dernières années. © CNRS Photothèque, Photographe : FAIN, Xavier**

## Résultats marquants des programmes nationaux

**E**n complément des grandes actions structurantes nationales et internationales, les programmes de l'Insu/OA ont toujours tenu à soutenir des projets de plus faible ampleur, demandant une programmation plus modeste et un financement relativement léger et adressant des questions précises et pointues dont l'impact scientifique est plus immédiat, et dont la portée peut être tout aussi importante et fondamentale. Ces actions complémentaires, qui ont utilisé les moyens d'observations, d'expérimentation et de modélisation, ont permis d'obtenir plusieurs résultats scientifiques marquants au cours de ces dernières années.

### Programme national chimie de l'atmosphère (PNCA)

Le PNCA a fortement accompagné le développement et la validation des deux grands modèles Mocage et LMDz-Inca et a permis de fédérer la communauté nationale des modélisateurs. Ces modèles maintenant opérationnels constituent des outils de références pour un certain nombre d'études en cours actuellement : étude du rôle de la stratosphère et de la biosphère dans le climat, prévision de la qualité de l'air, étude du bilan de l'ozone à l'échelle globale et de sa sensibilité aux précurseurs

■ Des expériences en soufflerie, utilisant des échantillons de sol récoltés sur différents continents, ont montré que le soulèvement de particules fines par érosion éolienne n'est possible qu'à partir d'un seuil énergétique, et que ce seuil est une fonction décroissante de la taille des particules. D'autre part, des études de terrain ont montré que les propriétés de surface des aérosols contrôlaient leur hygroscopicité, agissant ainsi sur la formation des noyaux de condensation et sur leur lessivage.

### Programme atmosphère et océan multi-échelles (Patom)

Le concept « d'observations ciblées » a été testé pour la première fois durant la campagne internationale Fastex (Front and atlantic storm-track experiment) dans l'optique d'améliorer la prévision des cyclogenèses en Atlantique Nord. L'analyse des

résultats montre que l'utilisation « d'observations ciblées » a un impact positif mais qu'elle est sensible à la méthode utilisée pour les assimiler. Cela a conduit à développer de nouvelles méthodes de ciblage qui prennent en compte explicitement les propriétés du système d'assimilation.

■ Le Patom a suscité un projet fédérateur dédié à l'étude des cirrus (Monumeep) qui utilise les compétences de la communauté en modélisation et observation, de l'échelle microphysique à la grande échelle. Dans ce contexte, le recoupement de différents jeux de données obtenus aux latitudes tropicales et tempérées des hémisphères nord et sud, et la combinaison d'instruments spatiaux (Polder), aéroportés (CPI, CVI, néphélomètre polaire) ou sol (lidar/radar/radiomètre) ont apporté de nouvelles connaissances sur les caractéristiques radiatives et microphysiques des cristaux de glace constituant les cirrus, tant visibles que subvisibles. Les répercussions en terme de modélisation, déjà tangibles à méso-échelle, devraient à court terme se propager vers la grande échelle.

### Programme atmosphère et océan multi-échelles (Patom) et Programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC)

La participation des équipes françaises au programme international Woce (World ocean climate experiment) a été importante et a permis de nombreuses avancées concernant l'Atlantique.

► Tout d'abord, la synthèse des études régionales, a produit un nouveau schéma de circulation pour l'eau profonde Nord Atlantique en Atlantique Sud qui met en évidence une séparation du courant de bord ouest et indique qu'une partie importante de l'export des masses d'eau vers le Sud se fait par un courant profond de bord est. Certains aspects des trajets de masse d'eau ainsi mis en évidence sont en désaccord avec les modèles globaux actuels à basse résolution. Par contre, le modèle français Clipper reproduit les courants zonaux alternés qui sont observés dans le bassin du Brésil.

► Le comportement de la variabilité atmosphérique dans la région Atlantique Nord – Europe a pu être caractérisé : il apparaît ainsi que les différents régimes climatiques ont été remarquablement stables lors des

50 dernières années et que le déplacement apparent vers l'Est des centres d'action de l'oscillation Nord Atlantique s'explique par une augmentation de la fréquence d'occurrence du régime NAO+ et non pas par un changement de structure spatiale. Le rôle de l'océan dans la récurrence de ces régimes et dans la prévisibilité a également fait l'objet de plusieurs études.

■ Il convient, par ailleurs, ici d'insister sur le démarrage d'un programme ambitieux d'observations dans l'Atlantique Nord. L'objectif est de fournir l'ensemble des observations nécessaires, sur une période décennale, pour qualifier la variation lente de l'océan et valider les modèles climatiques dans cette région. Outre un dense réseau de flotteurs Argo, les sections répétées dans le cadre de l'ORE-SSS (Sea surface salinity) et la couverture altimétrique depuis l'espace, un programme lourd de sections hydrologiques Ovide (Observatoire de la variabilité interannuelle et décennale en Atlantique nord) entre le Portugal et le Groenland a déjà donné lieu à deux campagnes en 2002 et 2004. Un premier résultat majeur est la mise en évidence de la variabilité de la cellule méridienne de circulation (15 Sv en 1997 contre 9 Sv en 2002, 1 Sverdrup = 106 m<sup>3</sup>/sec ou 0.001 km<sup>2</sup>/s). Ce résultat justifie à lui seul de poursuivre cette action pluriannuelle pour mieux comprendre le rôle de l'océan dans la variabilité lente climatique.

## Programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC)

Plusieurs résultats marquants sont également à mettre à l'actif du PNEDC :

► Une analyse statistique fine, corrigeant les ruptures de séries climatiques, a permis de détecter le signal anthropique en température sur le territoire français sur les tendances des 30 dernières années. Ce travail de détection du signal climatique s'est également intéressé à l'évolution sur le dernier millénaire, et ce à partir des archives historiques et de proxies. Un acquis important a été la reconstitution des températures d'été à partir des dates de vendanges.

► À plus grande échelle de temps, l'étude de l'évolution du climat européen pendant les événements « d'Heinrich » et « Dansgaard et Oeschger », qui marquent le cours de la dernière période glaciaire a permis de montrer par les spéléothèmes et les analyses palynologiques, que les événements d'Heinrich étaient caractérisés en Europe par des épisodes d'aridité intense.

► Disposant d'enregistrements de tout premier plan dans la glace, l'océan et sur les continents, un effort a été entrepris pour resituer ces enregistrements dans un cadre chronologique commun, reposant sur les datations C<sup>14</sup>, sur le couple Uranium/Thorium, sur les données paléomagnétiques et sur la courbe du

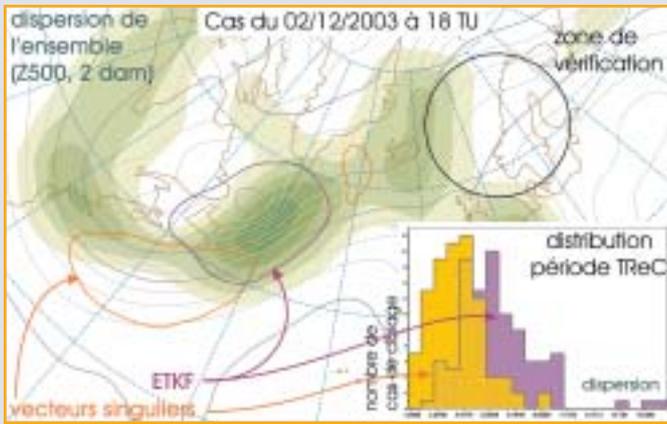
méthane afin d'en préciser le scénario complet. En raison de leurs propriétés de chronomètres, l'introduction des traceurs isotopiques dans la modélisation est une voie originale pour améliorer la confrontation modèles-données. En particulier, la prise en compte des données isotopiques dans le modèle Climber a permis de réduire très précisément la durée des événements d'Heinrich, dans la fourchette la plus courte.

► Le caractère quantificateur des isotopes a aussi permis de mettre en évidence le rôle des marges dans le contrôle de la composition chimique de l'océan actuel et passé, rôle indiscernable sur la base de bilans de concentration seulement. Ce résultat souligne la nécessité de bien contraindre les cycles actuels des « proxies » de paléocéanographie afin d'ajuster l'interprétation qui en est faite pour l'océan passé.

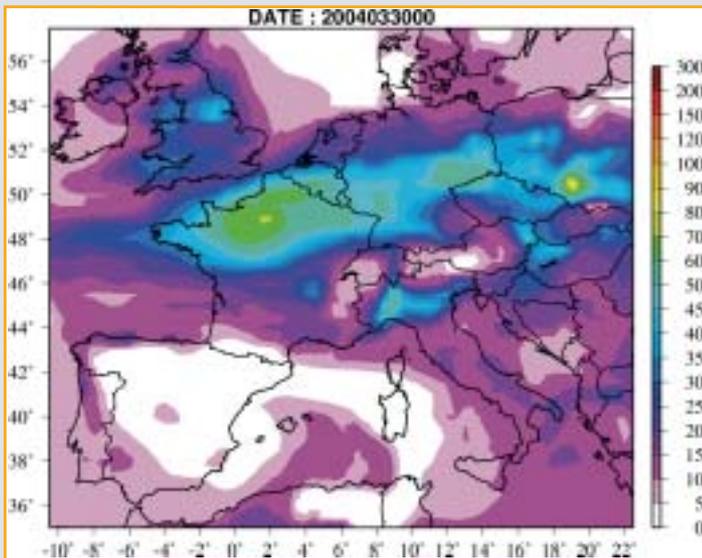
## Programme Processus biochimiques dans l'océan et flux (Proof)

Les campagnes internationales Biosope (Biogeochemistry and optics south Pacific experiment) dans le Pacifique et Keops (Kerguelen compared study of the ocean and the plateau in surface water) dans l'Océan Austral ont obtenu des résultats importants. Biosope a permis de montrer pour la première fois que des bactéries anoxygéniques photohétérotrophes sont fortement impliquées dans la synthèse de carbone particulaire dans la zone centrale (la gyre) du Pacifique Sud. Ces résultats pourraient apporter une réponse au paradoxe actuel que constitue la faiblesse supposée des taux de fixation de carbone par rapport aux processus de respiration dans ces vastes zones océaniques oligotrophes. Keops a montré que l'enrichissement naturel et régulier en fer des eaux superficielles du plateau de Kerguelen dans l'Océan Austral était responsable d'un puits de CO<sub>2</sub> au moins deux fois plus important que le puits consécutif à des fertilisations artificielles et discontinues. D'autres différences majeures conduisent à remettre en cause, au moins partiellement, l'intérêt des fertilisations artificielles pratiquées depuis dix ans, comme méthodologie de référence pour observer, comprendre puis modéliser la réponse de l'océan à des apports en fer.

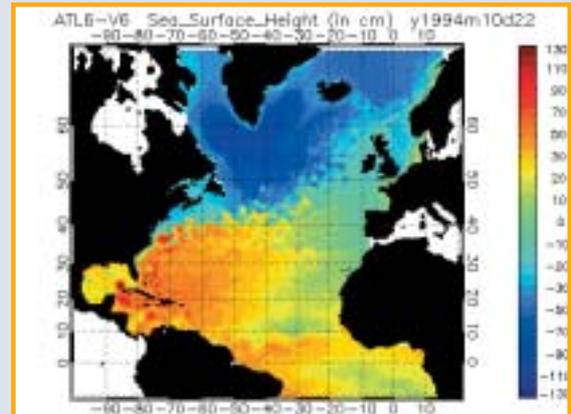
■ Ces dernières années, la communauté française a été leader dans l'extraction de grandeurs biogéochimiques autres que la concentration en « chlorophylle a » à partir de mesures satellitaires de la couleur de l'océan (SeaWiFS, Meris, Modis). Très prometteuses et originales, ces extractions concernent aussi bien l'estimation des grands groupes fonctionnels de phytoplancton que la quantification de la matière dissoute et particulaire, ou encore la détermination d'index sur la taille des particules marines.



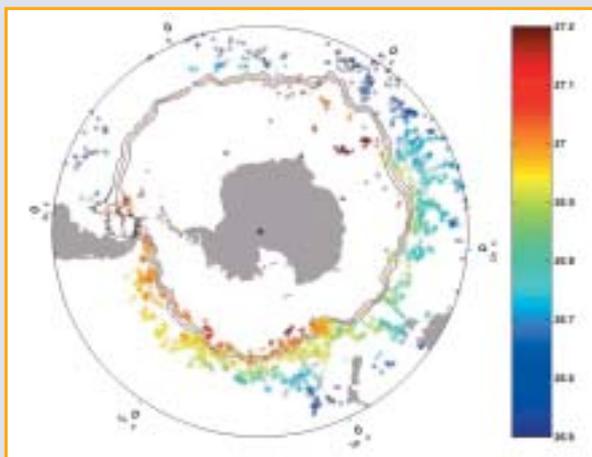
**Zone Fastex. Histogramme : distribution des valeurs de la dispersion de l'ensemble du CEPMMT dans les zones sensibles issues de vecteurs singuliers du CEPMMT (jaune) et de l'ETKF du Met Office (violet). Carte : cas du 02 déc. 2003, dispersion du géopotential à 500 hPa (zone en vert > 5 dam; intervalle : 2 dam), zones sensibles issues des vecteurs singuliers (orange) et de l'ETKF (violet) (taille 2 x 106 km<sup>2</sup>).**



**Concentration des poussières atmosphériques © modèle Chimère-dust.**



**Projet Clipper : hauteur de la mer en cm**



**Les données Argo et les données altimétriques ont été utilisées pour étudier les eaux modales formées en hiver dans la couche de mélange profonde nord du front subantarctique. Le trait rouge correspond à la position moyenne du front, les traits noirs à l'écart de sa position déterminée par 3 ans de données altimétriques. Les points représentent la densité de la couche de mélange en hiver issue de 3 ans de données. On note un maximum de densité dans la zone de formation des eaux antarctiques intermédiaires. © Legos/CNRS/Cnes**



**Profileur Argo © LOB-CNRS**

## Applications opérationnelles

L'objectif prioritaire de la communauté scientifique est de faire progresser la connaissance du fonctionnement de l'environnement de la Terre, en s'intéressant en premier lieu aux processus fondamentaux et à leur couplage. Cependant, cette recherche ne peut être complètement isolée de la demande sociétale, et doit nécessairement avoir des liens avec les questionnements des sphères politique et économique, ainsi que plus généralement du « public ». Cela concerne avant tout la prévision de l'état de notre planète (climat, pollution atmosphérique, etc.), et la gestion durable de notre environnement (ressources vivantes, conséquence des accidents météorologiques, qualité de l'eau, etc.). Ainsi, à la suite du progrès des connaissances et des moyens technologiques (tel que la puissance des ordinateurs), et de l'évolution des relations entre science et sociétés, une partie de la communauté océan-atmosphère s'est investie dans le transfert de compétences et de résultats académiques vers le domaine opérationnel, comme l'atteste la réussite de quelques projets ambitieux.

### Mercator

Mercator est un projet pré-opérationnel d'analyse et de prévision de l'océan hauteur, qui a conduit à la création par six organismes français (Cnes, CNRS, Ifremer, IRD, Météo France, Shom) en avril 2002 d'un GIP. Ce GIP est l'aboutissement d'une initiative des chercheurs remontant à 1995 qui s'est concrétisé par un processus de transfert de savoirs et d'outils entre les laboratoires de recherche et les équipes opérationnelles. Le modèle numérique d'océan OPA et les méthodes d'assimilation de données, qui sont au cœur du système d'analyse et de prévision de Mercator-Océan, ont été développés dans les laboratoires de recherche français. Par exemple, l'expérience acquise dans le cadre de projets nationaux de modélisation à haute résolution de l'Atlantique, comme Clipper, a été précieuse. Un partenariat original a été mis en place entre les laboratoires de recherche et le GIP. Un Groupe Mission, similaire à ceux accompagnant les projets spatiaux, a été constitué avec les objectifs de coordonner la recherche amont nécessaire à l'évolution des systèmes, de participer à la validation des produits et de faciliter les transferts entre la recherche et Mercator-Océan. Ces transferts sont constants. Le GIP Mercator-Océan, en répondant à l'attente de ses membres, est ainsi devenu un partenaire incontournable de l'océanographie pré-opérationnelle en Europe.

### Sim (Safran-Isba-Modcou)

Une modélisation hydrométéorologique de la France, fondée sur le modèle Sim, a été développée dans le cadre d'un projet soutenu par le PNRH. Sim consiste à modéliser les bilans hydriques et énergétiques de surface et les débits des grands fleuves à partir des forçages météorologiques observés et analysés par Safran sur une grille régulière de 8 km sur l'ensemble de la France. Un des intérêts de Sim est de simuler le cycle continental de l'eau avec un schéma de surface (Isba) couplé à une modélisation atmosphérique et hydrologique (modèle Modcou) à l'échelle régionale. Le système a montré une bonne capacité à simuler les débits journaliers des grands bassins ( $S > 1000 \text{ km}^2$ ) sur de longues périodes de temps. Ainsi, les premières climatologies des composantes du cycle de l'eau (évaporation, ruissellement, neige, eau du sol,...) ont pu être établies de façon cohérente avec la météorologie et l'hydrologie.

■ A la suite de ces développements, le modèle Sim a été transféré vers les services opérationnels pour le suivi en temps réel du bilan hydrique de surface et des débits des grands fleuves. Cette application est en œuvre depuis début 2004. En complément de son intérêt pour la surveillance de la ressource en eau du territoire français, du statut hydrique des sols, Sim va permettre de mieux initialiser les réservoirs de surface des modèles météorologiques de méso échelle tels que Méso-NH et Arome.

### Prévisions et observations de la qualité de l'air (Prev'Air)

Concernant la qualité de l'air, le PNCA est à l'origine du soutien scientifique au développement d'une plateforme expérimentale (Pionner) proposé par un consortium de plusieurs laboratoires autour des modèles Chimere (IPSL-CNRS) et Mocage (Météo France). L'objectif était la mise au point de modèles de pollution atmosphérique à différentes échelles. Avec le soutien du MEDD et de l'Ademe, le transfert à l'opérationnel a finalement abouti au système Prev'Air, géré par l'Ineris, de prévision opérationnelle de l'ozone et des oxydes d'azote. La plateforme est en évolution constante dans les laboratoires du consortium et sera un des éléments GMES pour la thématique « pollution de l'air ».

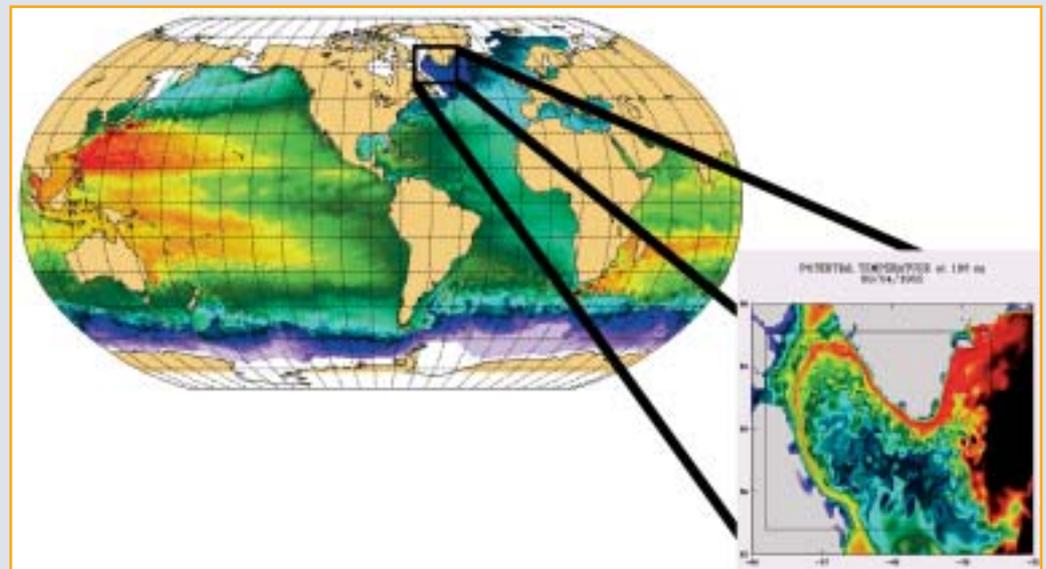
## • Bilan

### Arome

Le code atmosphérique Més0-NH résulte d'un étroit partenariat entre Météo France, le CNRS et les universités. Conçu comme un modèle de recherche, il intègre l'état de l'art en matière de paramétrisations physiques. Son utilisation intensive dans les grandes campagnes organisées par la communauté (Fastex, Map, ...) a permis de mettre en évidence qu'un gain de prévisibilité était possible aux échelles kilométriques, pour lesquelles la convection est explicitement résolue. Ces résultats ont pesé sur les choix stratégiques de Météo France et ont contribué à la

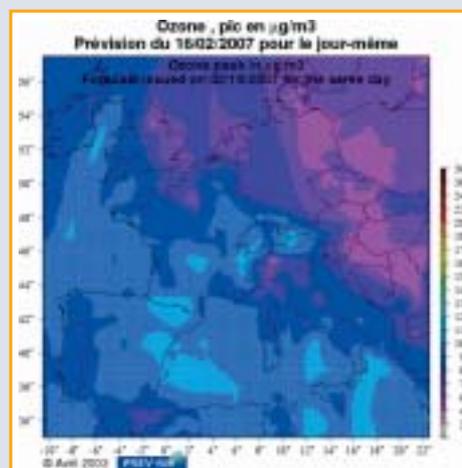
définition du projet Arome, nouveau modèle de prévision opérationnel à l'échelle kilométrique pour 2008.

■ Par exemple, la représentation du cycle de l'eau est largement fondée sur les paramétrisations physiques et microphysiques développées par les chercheurs. Il y a donc un transfert effectif de savoir faire et de connaissances au profit de l'opérationnel. Ce transfert ne se limite pas à l'échange de codes numériques. Il implique également une participation des chercheurs à des actions de formation auprès des utilisateurs des services opérationnels. Il est exemplaire d'une coopération féconde entre la recherche académique et les missions finalisées d'un grand organisme.



**A gauche : topographie de surface océanique et couverture de glace (en blanc) après 10 ans d'intégration (simulation globale DRAKKAR au 1/4° avec modèle de glace de mer multicouche; forçage atmosphérique sans assimilation de donnée). Le développement de ce modèle a permis à la mise en œuvre opérationnelle par Mercator du prototype d'océan global PSY3.**

**A droite : raffinement de maillage AGRIF au 1/15° en Mer du Labrador, représentant la température instantanée à 200m de profondeur (les eaux les plus froides sont en bleu foncé). La turbulence à méso-échelle mélange des masses d'eaux d'origine Arctique et subtropicales dans cette région fortement refroidie par l'atmosphère. Les eaux ainsi produites rejoignent l'Atlantique Sud en profondeur le long du continent américain. Les structures turbulentes obtenues préfigurent celles qui seront représentées par les systèmes opérationnels à haute résolution de Mercator.**



**Prev'Air : Prévision de l'ozone pour le jour même en microgramme par mètre cube. © Prév'Air**

## Conclusion

L'analyse du fonctionnement des programmes de l'Insu et des résultats obtenus par leur intermédiaire montre un bilan extrêmement positif sur plusieurs points :

- ▶ Ils ont eu et continuent à avoir un rôle structurant pour la communauté océan-atmosphère en France. Cet impact résulte à la fois de la création d'un lieu d'échanges et de discussions, de la synergie provenant d'actions d'envergure portées par l'Insu, d'une très bonne lisibilité de ces programmes au sein de la communauté nationale. Cela peut être illustré par Proof, qui a été à l'origine d'une réelle synergie parmi des océanographes géochimistes, qu'ils soient observateurs, expérimentateurs ou modélisateurs, et a ouvert des portes vers les biologistes et les dynamiciens.
- ▶ Ils ont permis d'initier et d'accompagner des projets inter-disciplinaires, pluri-organismes, généralement autour de campagnes ambitieuses d'observation sur le terrain (Pomme, Amma, Escompte, etc.) s'intéressant à un certain nombre de processus bien ciblés, interagissant entre eux (transport – physique, physique – chimie atmosphérique, dynamique – biogéochimie marine, etc).
- ▶ Certaines actions ont eu un pouvoir d'attraction au niveau international, ce qui a permis d'une part de viser des objectifs plus ambitieux que ceux qui auraient été affichés dans un cadre strictement national, et d'autre part de procurer à la communauté nationale une très forte visibilité internationale (Amma, Map).
- ▶ D'une manière non déconnectée du point précédent, les programmes nationaux ont aussi permis à la communauté française d'acquérir une expertise reconnue, ce qui lui a donné l'opportunité d'occuper une position de leadership au niveau européen (Réseau d'excellence Eur-Oceans, Amma, Mersea, etc).
- ▶ Parallèlement à ces actions de grande envergure, les programmes ont par ailleurs soutenu des projets de plus petite taille et plus ciblés, portant sur des études de processus clé, donnant rapidement des résultats visibles (études de modélisation de l'impact de la dynamique à petite échelle sur la biologie marine et la chimie atmosphérique, études expérimentales en biogéochimie marine et chimie atmosphérique, études fondamentales en dynamique des fluides géophysiques, etc.).
- ▶ Enfin, amorcé depuis la fin des années 1990, le transfert des connaissances vers les secteurs finalisés a été rendu possible et effectif grâce au dialogue qui a

pu se nouer entre les programmes des différents organismes/ministères, et grâce à des réseaux de partage de compétences, plus ou moins formalisés.

■ Ces projets ou actions n'auraient pas pu être menés à bien par notre communauté sans les moyens d'accompagnement importants mis à sa disposition :

▶ La mise en œuvre de deux avions et la création de l'Unité Mixte Cnes/CNRS/Météo France Safire (Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement), responsable de la gestion et de la programmation des avions et des instruments embarqués, est positive et répond majoritairement aux besoins exprimés par la communauté. Parallèlement, un effort important a été consacré au renouvellement de la flotte avec la mise en service du « Pourquoi Pas ? » de l'Ifremer et le remplacement de plusieurs navires de station. Les moyens d'observation sur le terrain doivent également être à la hauteur des enjeux. La mise en service de ces moyens nationaux doit s'appuyer sur l'existence de budgets consolidés qui prennent bien en compte leur coût de fonctionnement.

▶ L'utilité des Services d'observation a été largement démontrée. Ces structures ont vocation à être d'une durée de vie suffisamment longue (au moins la dizaine d'années) pour pouvoir être en mesure de répondre à leur mission. La stabilisation des moyens humains est un enjeu majeur, et malgré la création de la section Surfaces continentales-océan-atmosphère (SCOA) au sein du Conseil national des astronomes et physiciens (Cnap), certains services n'ont pas encore le personnel suffisant. Cette remarque générale vaut aussi pour les bases de données qui sont trop souvent gérées sans perspective de continuité à long terme : un soutien doit être envisagé de manière à ne pas perdre l'investissement initial très lourd réalisé lors de la collecte des données sur le terrain.

▶ Malgré l'effort récent de création de postes Ingénieurs-techniciens-administratifs-CNRS (ITA-CNRS), le soutien aux pôles thématiques doit être renforcé car un trop grand recours aux contrats à durée déterminée (CDD) est incompatible avec les objectifs de service de ces pôles surtout avec le développement de la composante spatiale qui nécessite une expertise spécifique dans le traitement de données dont le volume est très important.

▶ Enfin, notre communauté ne peut fonctionner sans moyens de calcul suffisants. Les besoins ont beaucoup évolué ces dernières années et les efforts dans ce domaine doivent être poursuivis.

# Programme atmosphère et océan multi-échelles (PATOM)

## Objectifs scientifiques

L'objectif général du Patom était la compréhension des processus dynamiques de l'atmosphère et de l'océan aux petites et moyennes échelles. À cette fin, il fédérait les efforts de la communauté française autour de thèmes et d'outils de recherche communs et coordonnait la politique scientifique de la communauté concernée. Ainsi, le Patom a encouragé les recherches coopératives, regroupant des équipes qui utilisaient des approches variées : études théoriques ou expérimentales, modélisations physique et numérique, développement et mise en oeuvre de moyens lourds (avions instrumentés, radars, bouées, équipements à la mer), méthodes d'analyse.

■ En raison des thématiques étudiées, le Patom se trouvait naturellement en interface avec d'autres programmes nationaux : le PNCA pour le transport des polluants et autres composants atmosphériques ; Proof et le Pnec (Programme national environnement côtier) pour le transport et l'évolution de la biologie et la sédimentologie marines ; le PNEDC pour l'amélioration des paramétrisations des modèles climatiques globaux (GCM) ; Ecco (Ecosphère continentale : processus et modélisation) pour le couplage avec l'hydrologie et les échanges avec la surface continentale.

■ Le Patom par ailleurs a incité et fédéré un grand nombre d'études amont nécessaires au développement des modèles de prévision météorologique (menés à Météo France), ou océanique (menés par le GIP Mercator-Océan). En retour, les outils de type opérationnel développés par ces organismes ont eu des retombées extrêmement positives sur le programme. Une bonne illustration dans ce domaine est le jeu de ré-analyses météorologiques du Centre européen de prévision météorologique à moyen terme largement utilisé au sein du Patom.

## Actions et résultats marquants

Parmi les actions fédératives qui ont eu ou auront à terme des retombées importantes sur une large communauté (recherche, applications) nous citerons :

- ▶ L'analyse des données de la campagne internationale Fastex portant sur l'étude des cyclogénèses (notamment les cyclogénèses explosives) en Atlantique nord-est. Certains des outils développés à l'occasion de Fastex ont ensuite été mis en oeuvre dans le cadre d'études sur les dépressions abordant les côtes européennes (notamment à travers l'analyse de la tempête de 1999).
- ▶ L'analyse des observations de la campagne internationale Map portant sur la dynamique atmosphérique, la convection nuageuse et les précipitations intenses en zone fortement perturbée par l'orographie (région des Alpes).
- ▶ L'analyse des données de la campagne Indoex (Indian Ocean Experiment) portant sur la dynamique atmosphérique et l'impact des aérosols d'origine anthropiques sur les conditions atmosphériques au-dessus de l'Inde et de l'Océan Indien.
- ▶ La mise en place initiale du projet d'étude de la mousson africaine (Amma) avec des études amont sur la variabilité intra-saisonnière de la mousson.
- ▶ Le démarrage d'une action coordonnée autour du couplage entre atmosphère et hydrosphère, dans le cadre notamment de la mise en place de l'observatoire de recherche (ORE) « Cévennes-Vivarais ».
- ▶ La mise en place d'une action coordonnée sur l'étude des cirrus (microphysique, dynamique et impact radiatif).

▶ Une contribution à la campagne Escompte dédiée à l'étude de la pollution urbaine à l'échelle de la ville. La contribution soutenue par le Patom, se situait plutôt à petite échelle (échelle de la rue, du quartier).

▶ L'analyse des données de la campagne Fetch (Flux, état de la mer et télédétection en condition de mer variable) portant sur les interactions océan-atmosphère et la circulation océanique en zone côtière (Golfe du Lion).

▶ La mise en oeuvre et le début de l'exploitation de la campagne Pomme portant sur la dynamique à méso-échelle dans l'océan et le rôle des processus de subduction des eaux modales sur la biogéochimie marine.

▶ Le soutien aux études thématiques basées sur les simulations numériques de l'Atlantique du projet Clipper et l'analyse des données Woce (World ocean circulation experiment).

▶ La mise en place d'un projet coordonné sur la dynamique océanique côtière en Méditerranée (Golfe du Lion).

▶ La mise en place d'une action coordonnée sur l'hydrodynamique du déferlement des vagues induisant un fort transport sédimentaire en zone côtière.

■ La liste de ces actions coordonnées ne doit pas cacher les études plus ciblées, mais qui sont novatrices et indispensables à l'avancée des connaissances. On peut citer dans ce registre :

▶ La participation à l'expérience américaine IHOP (International H<sub>2</sub>O project) portant sur la variabilité du contenu en vapeur d'eau atmosphérique dans la couche limite.

▶ L'étude et la modélisation des cyclones tropicaux.

▶ L'analyse de la circulation de l'eau en Atlantique nord-est à partir de la combinaison de données de trois campagnes passées (Arcane-Semane/Cambios).

▶ Les travaux sur l'assimilation de données.

▶ Les travaux de physique fondamentale en mécanique des fluides géophysiques.

## Intégration internationale

Vis-à-vis de l'Europe, Le Patom a joué un rôle très complémentaire. Tout d'abord, plusieurs thèmes prioritaires du Patom sont très peu soutenus par l'Europe qui favorise dans le domaine de l'environnement, soit les études sur le climat, soit les études d'impact. Par ailleurs le Patom a été un élément clé de la structuration de la communauté nationale, car il a permis d'initier des projets pouvant à terme déboucher dans un programme européen (Amma en est un exemple récent). Enfin, lorsque des programmes européens se terminent, il est indispensable que les activités de recherche fructueuses, engagées grâce aux soutiens européens par la communauté française, puissent être poursuivies. Ce point est illustré par le retour important de la communauté océanographique dans les années 2000 vers les programmes nationaux alors que la plupart des financements européens obtenus dans les années 90 dans le cadre notamment des programmes Mast (Marine science and technology programme) se sont taris. Le Patom doit donc être considéré comme complémentaire des efforts de structuration européenne de la recherche.

■ Vis-à-vis des grands programmes internationaux, le Patom a financé des recherches qui s'insèrent clairement dans certains de ces programmes, notamment le WCRP (World Climate Research Program) de l'Organisation Météorologique Mondiale, (sous-programme Gewex (Global energy and water experiment) pour l'atmosphère, Scor group pour l'océan), et WWRP (Word weather research program) de l'OMM (Organisation météorologique

mondiale) également. Ces relations se traduisent, d'une part par la recherche de reconnaissance par ces programmes internationaux d'actions de recherches à initiative française (par exemple la campagne Map reconnue par le WWRP et le projet Amma reconnu par Gewex), soit par la mise en place de projets nationaux comme participation à des actions internationales décidées par ces programmes, par exemple Thorpex (The observing-system research and predictability experiment) et Medex dans le cadre du WWRP (World weather research program).

## Forces et faiblesses

Au chapitre des points forts, il faut reconnaître la capacité du Patom à mobiliser un nombre important d'équipes et de chercheurs autour de quelques grands projets fédérateurs (Fastex, Map, Pomme, Amma, études des nuages, ...), réunissant des compétences et équipes diverses et qui ont souvent une très bonne visibilité et insertion internationale. Le soutien du Patom autour de ces grands projets dans leur phase de préparation aussi

bien que dans leurs phases de mise en place et d'exploitation a été une des forces du programme. Cette capacité s'accompagne néanmoins d'une volonté de laisser la place à des projets d'envergure plus limitée (en terme financier et de personnel, ainsi que de durée) et qui apparaissent comme novateurs sur le plan scientifique. À l'avenir, il apparaît nécessaire de garder cet équilibre entre grands projets fédérateurs et projets d'envergure plus limitée.

■ Au chapitre des difficultés, il faut noter en premier lieu, que malgré l'ouverture des thématiques du Patom depuis 1999, les budgets n'ont pas significativement évolué. Enfin, sur certains aspects, les relations avec les autres programmes doivent être mieux définies. C'est notamment le cas pour le thème de l'hydrodynamique côtière (relations avec le Pnec) et pour les études de processus pour l'océan du large (relations avec le GMMC (Groupe mission mercator coriolis). Le lien avec la dynamique de l'atmosphère et de l'océan aux échelles intra-saisonnnières, jusqu'alors dans le champ du PNEDC, devrait aussi être réexaminé.

## Programme national de chimie atmosphérique (PNCA)

### Objectifs scientifiques

Au cours des dernières décennies, la recherche atmosphérique a été de plus en plus axée sur les changements induits par les activités humaines, leur couplage avec les processus naturels et les interactions étroites entre les processus physiques et chimiques à toutes échelles de temps et d'espace qui rendent le système chimique hautement complexe. L'objectif final de cette recherche est d'appréhender, dans toutes leurs dimensions, les conséquences des modifications de la composition de l'atmosphère sur notre environnement. De cet effort doit résulter une meilleure connaissance des processus de base et simultanément l'émergence d'une vision plus intégrée de la distribution des espèces chimiques réactives et de leurs effets sur l'environnement à différentes échelles.

- C'est pourquoi les recherches soutenues par le PNCA ont concerné quatre grands thèmes :
  - ▶ La pollution atmosphérique au niveau des zones urbaines et périurbaines et son impact à l'échelle régionale ;
  - ▶ L'impact des nuages sur la chimie atmosphérique et le rayonnement ;
  - ▶ L'étude du couplage entre troposphère et stratosphère et de son impact sur l'évolution de l'ozone ;
  - ▶ Les interactions des espèces à courte durée de vie avec le climat.
- Ces actions prioritaires ont été accompagnées par la mise en œuvre d'études amont et d'outils transversaux qui sont indispensables :
  - ▶ Études en laboratoires de processus chimiques atmosphériques ;
  - ▶ Études spectroscopiques d'espèces atmosphériques ;
  - ▶ Assimilation de données chimiques.

### Actions et résultats marquants

Parmi les actions soutenues par le PNCA, il faut en premier lieu mentionner les actions coordonnées ayant permis de grandes expériences (telle qu'Escompte) ou de fédérer des communautés.

- Le programme Escompte avait pour objectif prioritaire de réaliser une campagne de mesure intensive dans la région de Marseille-Berre afin de construire une base de données tridimensionnelle, très détaillée, des émissions de polluants

primaires, de la composition et de la dynamique de l'atmosphère lors d'épisodes de pollution atmosphérique. Cette base de données sert désormais de référence permettant l'étude de processus impliqués dans la pollution de l'air en milieu urbain et périurbain. Cette base de données est également essentielle pour la qualification des modèles physico-chimiques de pollution atmosphérique travaillant à l'échelle locale et à l'échelle régionale et contribue donc à leur amélioration constante. Certains de ces modèles sont désormais utilisés de façon opérationnelle pour la prévision de la qualité de l'air à l'échelle continentale (système PRrevAir à l'Ineris) et régionale (au sein des réseaux de qualité de l'air).

- Un effort important de modélisation de la chimie atmosphérique à grande échelle pour l'étude des interactions chimie-climat a été fourni. L'objectif était d'accompagner le développement et la validation des deux modèles globaux de la communauté française : LMDz-Inca et Mocage et de fédérer la communauté nationale. Le projet est resté volontairement orienté vers des aspects très techniques, en amont d'applications liées à certains grands projets comme Escompte. Ainsi le PNCA a permis de maintenir et renforcer la dynamique de la communauté chimie-climat.
- Biopollatm (Biosphère et pollution atmosphérique en zone rurale et périurbaine) s'est intéressé à l'étude des facteurs environnementaux régulant les échanges de polluants entre la végétation, principalement les cultures, et l'atmosphère. L'objectif était d'améliorer l'estimation des émissions et des dépôts des composés azotés et de l'ozone et de mettre au point des modèles ou paramétrisations visant à améliorer l'estimation des flux dans les modèles de chimie transport.
- Le PNCA a également permis de fortes avancées quant à la compréhension des processus de transport et des barrières dynamiques. Ainsi, l'impact des polluants continentaux et de la stratosphère sur la variabilité de la troposphère libre, les processus de transport entre couche limite et haute troposphère, le transport à travers la barrière tropicale dans la moyenne atmosphère, les échanges entre stratosphère et troposphère induits par la convection profonde dans la zone tropicale et le transport d'ozone ont été caractérisés.
- Finalement, le PNCA a permis de structurer différentes communautés, créant ainsi une force vive, suffisamment forte

pour aborder différents problèmes d'importance majeure comme la physico-chimie des aérosols mélangés, la chimie des composés organiques volatils (en phase gazeuse et condensée comme l'eau ou la glace) ou la spectroscopie d'espèces atmosphériques afin de permettre une restitution de qualité des mesures spatiales (Odin, Mipasa, TES, IASI...).

■ Il est essentiel de souligner que le programme a également soutenu des actions de moindre envergure mais de capacité très innovante.

### Intégration internationale

Le PNCA a, tout d'abord, joué un rôle très complémentaire à celui des programmes européens, soit en soutenant des actions dont la thématique n'apparaissait pas dans les appels d'offres (AO) émis par la Commission Européenne, soit en soutenant le montage de propositions en réponse à ces AO et en fournissant par la suite les financements complémentaires nécessaires à la mise en place de ces projets et au soutien dans la durée de l'analyse des résultats obtenus.

■ Dans ce cadre, il faut mentionner les projets du 5e PCRD Hibiscus et Trocinox auxquels plusieurs équipes françaises ont été associées soit directement au titre de partenaire (voire de Principal Investigateur), soit indirectement via un projet coordonné soutenu par le PNCA – accroissant la visibilité de l'action française. C'est également le cas, dans le 6ème PCRD, des projets Scout (la France ayant la responsabilité des observations chimiques sous ballons), Prism (PRogramme for Integrated earth System Modelling), du réseau d'excellence Accent et de GEMS (Global Earth Monitoring System).

■ Les thèmes soutenus par le PNCA sont aussi reconnus au niveau international. C'est le cas du volet concernant l'évolution de l'ozone stratosphérique qui est un des thèmes majeurs de Sparc (Stratospheric Processes and their role in Climate) projet du WCRP (World Climate Research Programme). C'est bien sûr le cas d'Igac (International global atmospheric chemistry), projet soutenu par le Programme International Géosphère-Biosphère (IGBP).

■ Il faut aussi mentionner le soutien fort apporté aux projets spatiaux soutenu au niveau international (Odin, Envisat) ou soumis (Traç, Geotrope) dans lesquels des équipes françaises sont fortement impliquées.

### Forces et faiblesses

La principale force du PNCA provient certainement de l'existence d'un large panel d'organismes soutenant ce programme de l'Insu. L'implication des départements Sciences physiques pour l'ingénieur (SPI), Sciences physiques et mathématiques (SPM) et Sciences chimiques (SC) du CNRS est un point particulièrement important puisque au-delà de l'aspect financier, il traduit l'implication d'une large communauté couvrant des compétences diverses autour de la chimie atmosphérique (chimistes de laboratoire, spectroscopistes, atmosphériciens...). Mais l'engagement de sociétés ou d'agences finalisées (Ademe, Total, EDF) est également exceptionnel. Il est dû à une recherche fondamentale de qualité, soutenue par le PNCA, mais dont on perçoit les voies de transfert possibles pour répondre aux questions économiques ou sociétales. Le positionnement du PNCA répond parfaitement au besoin des agences autant intéressées par les recherches en amont que par des produits réellement appliqués.

■ Il a su aussi tisser des liens forts avec le Cnes, partenaire indispensable pour l'aspect spatial (satellites et ballons) sur des thèmes de recherches complémentaires à ceux soutenus par le comité Tosca (Terre, océan, surfaces continentales) de cet organisme. Il en est de même avec le Programme Primaqual du MEDD (présence d'un représentant du MEDD aux réunions du PNCA, membres communs aux deux conseils scientifiques (CS), participation effective de membres du CS du PNCA en tant qu'experts invités au CS Primequal), dont les objectifs de recherches sont plus tournés vers l'applicatif et aussi avec l'Institut Paul Emile Victor (IPEV) pour les recherches dans les zones polaires. Il a ainsi donné une forte cohérence à la recherche française en chimie atmosphérique. Mais il est aussi important de souligner certains aspects qui ont moins bien fonctionné. Cela concerne les thématiques relevant des grandes questions sociétales, pour lesquelles une dispersion dommageable de moyens humains limités est observée. Ce constat s'applique particulièrement à la politique des Régions en matière de recherche. Il faut également noter que la gestion des projets en interface des autres programmes nationaux (en particulier Patom et Poof) n'a pas toujours été optimale.

## Programme national en environnement côtier (PNEC)

### Objectifs scientifique

Le programme national environnement côtier (Pnec), qui développait des recherches fondamentales sur les zones côtières, a été un programme original par le caractère pluri organismes (Ifremer, CNRS, IRD, Total, Cnes, BRGM, Cemagref) de sa direction et de son financement, et par la diversité des disciplines impliquées.

■ Les chantiers correspondaient à des opérations pluriannuelles menées dans des zones géographiques déterminées, permettant d'assurer des recherches pluridisciplinaires autour d'un thème majeur et sur le moyen terme. On distinguait :

▶ Des chantiers à l'échelle de régions côtières qui ont permis de quantifier (1) des flux de matière intervenant dans la production biologique et les cycles biogéochimiques en Méditerranée Nord Occidentale et en Manche, ou (2) des dynamiques de production au sein des réseaux trophiques et leurs impacts sur les ressources halieutiques dans le Golfe de Gascogne ;

▶ Des chantiers dans des systèmes fermés ou semi-fermés avec des problématiques de bilan de production, de cycles biogéochimiques et des facteurs de disfonctionnement d'origines diverses (microbienne, contaminants, ...). Il s'agit de chantiers Lagunes méditerranéennes, Lagon de Nouvelle-Calédonie, Baie du Mont-Saint-Michel ;

▶ Des chantiers plus localisés avec des problèmes environnementaux plus ciblés : bloom de Phaeocystis en Manche Est, apports sédimentaires sur le Plateau continental et littoral de Guyane.

■ Les Actions de recherches thématiques (ART) ont résulté de la volonté d'inciter des recherches innovantes et correspondaient à des objectifs spécifiques du conseil scientifique :

▶ Méthodologie sur des mesures de flux biogéochimiques ou de dynamique sédimentaire ;

▶ Méthodologie d'analyse statistique de séries à long terme des populations et écosystèmes marins côtiers en relation avec les facteurs hydro climatiques et anthropiques ;

- ▶ Cycles biologiques d'espèces marines :
  - Animales en relation avec les structures hydrodynamiques ;
  - Algues toxiques, des points de vue dynamique de population et impact sur l'environnement ;
  - Microbiennes, des points de vue dynamique de population et impact sanitaire sur l'environnement ;
- ▶ Développement d'outils d'évaluation économique et d'instruments de régulation pour une gouvernance environnementale.

■ En raison des thématiques étudiées, le Pnec se trouvait naturellement en interface avec d'autres programmes nationaux : le Patom (pour le transport hydrodynamique) ; Proof (pour la contribution des zones côtières aux cycles biogéochimiques globaux) ; Ecco (pour le couplage avec l'hydrologie et les échanges avec la surface continentale) ; Liteau (pour les prolongements vers les utilisateurs de la recherche).

## Actions et résultats marquants

Parmi les résultats marquants, on peut citer au niveau des chantiers :

▶ La mise en évidence d'un fonctionnement écologique à fortes irrégularités saisonnières sur le plateau continental du Golfe de Gascogne, avec l'apparition de blooms phytoplanctoniques (diatomées) hivernaux gouvernant une succession d'événements de mars à juin, notamment dans les panaches de la Loire et de la Gironde. Les conséquences de ces blooms sur les consommateurs herbivores, puis en cascades sur les autres consommateurs (poissons) jusqu'aux prédateurs supérieurs (mammifères et oiseaux marins) a été explorée et offre une vision nouvelle de la structuration des réseaux trophiques.

▶ L'hypothèse actuelle sur l'importance trophique de la production primaire marine d'origine microphytobenthique pour le développement des élevages d'huîtres et de moules en zone intertidale, notamment établie pour le bassin de Marennes Oléron, apparaît infirmée dans le cadre de la Baie du Mont-Saint-Michel. Il a été montré dans le cadre du Pnec que la production primaire marine pélagique joue un rôle plus important que la production microphytobenthique, montrant la nécessité d'intégrer l'interface littoral-mer côtière.

▶ Une description des modalités de dispersion et de consommation par l'échelon primaire des nutriments apportés par le Rhône et, au niveau de l'ensemble du Golfe du Lion, des bilans de matière à l'échelle annuelle assez réaliste. Les actions actuelles ont pour but de préciser les relations avec le large et les réelles capacités d'export.

■ Au niveau des études transversales et innovantes, indispensables à l'avancée des connaissances et structurantes pour certaines communautés, on peut citer dans ce registre :

▶ L'action transversale « Ecologie microbienne » qui a stimulé l'émergence de l'écologie virale marine en France pour l'étude du rôle des virus dans le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens ;

▶ L'action transversale « Dynamique sédimentaire », qui par un rapprochement des modélisateurs et des expérimentateurs, a offert une nouvelle vision de la dynamique des plages sableuses (morpho dynamique, transport sédimentaire), mise maintenant à profit pour l'aménagement des zones côtières ;

▶ Les couplages physique-biologie qui ont permis par exemple de préciser l'impact de l'hydrodynamique sur le recrutement des sardines dans l'upwelling du Benguela. Cette approche a bénéficié d'une bonne visibilité au niveau international Globec (Global ocean ecosystem dynamics, 1999-2009).

## Niveau international

Le Pnec a offert une large reconnaissance nationale à des actions soutenues dans un cadre international. Les projets de recherche présentés précédemment ont contribué à plusieurs programmes affiliés ou non au Programme International Géosphère - Biosphère (PIGB). Le programme LOICZ (Interactions continent -

océan en zone côtière) est en partie représenté dans les chantiers Méditerranée Nord Occidentale, Manche, Lagunes méditerranéennes, apports sédimentaires sur le Plateau continental et littoral de Guyane, et dans plusieurs actions de recherche thématiques (ART). De plus, plusieurs projets développés dans le Pnec ont déjà contribué aux activités d'Eloise (European land-ocean interaction studies). Le programme Globec est représenté dans le chantier Golfe de Gascogne et deux actions de recherche thématique. Le programme Geohab (Global ecology and oceanography of harmful algal bloom, lancé en 2003) était directement représenté dans le chantier bloom de *Phaeocystis* en Manche Est, et deux actions thématiques. Le programme IHDP (International human dimension program on Global environmental change), enfin, est représenté dans le thème 4 du programme Pnec.

■ Les forts liens avec LOICZ, Globec et Geohab ont favorisé l'implication française dans les Réseaux d'excellence (REX) Euroceans et Marbef, dont plusieurs acteurs du Pnec se sont retrouvés comme Principal Investigateur.

## Forces et faiblesses

Au chapitre des points forts, il faut reconnaître la capacité du Pnec à mobiliser un nombre important d'équipes et de chercheurs de différents instituts autour de quelques grands projets fédérateurs, réunissant des compétences et équipes diverses de physiciens, sédimentologues, géochimistes, chimistes, biologistes.

■ Certains projets, comme les chantiers des actions de recherche thématiques, ont eu une très bonne visibilité et insertion internationale avec des résultats scientifiques significatifs. On peut citer d'une part le chantier Golfe du Lion, pris comme exemple par le comité scientifique de LOICZ (2001) en termes de niveau de connaissance et d'acquisition de données pour effectuer des bilans quantitatifs de zone côtière océanique ; et, d'autre part, la modélisation couplée physique-biologie en zone côtière pour comprendre les distributions spatio-temporelles d'espèces planctoniques et de poissons publiées dans le cadre de Globec (2002).

■ La mise en place d'une relation entre la recherche fondamentale et les questions de société, a été relayée par la coordination des projets Pnec et Liteau. Des résultats concrets apparaissent sur des périodes assez longues, comme dans le cadre de l'étude de l'étang de Thau (Chantiers Lagunes méditerranéennes) qui a une histoire plus longue (Pnec puis Pnec et Liteau).

■ La première phase du Pnec qui s'est achevée en 2003 a représenté une période de transition dans la continuité de quatre anciens programmes Pnec, PNDR, PNEAT, PNRCO. Cela a entraîné une diminution significative de la masse de crédits disponible, qui s'est accentuée pour la seconde phase. Certaines communautés reconnues à travers les précédents programmes se sont trouvées déstructurées (communautés coralliennes, par exemple).

■ L'amplitude du programme a entraîné une tendance à la dispersion thématique, notamment pour les chantiers, et il faut constater une certaine inégalité des projets en termes de volume d'activité et de production scientifique.

■ Les outils, notamment la modélisation, ont parfois été privilégiés au détriment des questions scientifiques.

■ Les relations avec les autres programmes devraient être mieux définies. C'est notamment le cas pour le thème de l'hydrodynamique côtière (relations avec le Patom), Proof et pour les études de relations climats-dynamique des écosystèmes côtiers.

## Programme national d'étude de la dynamique du climat (PNEDC)

### Objectifs scientifiques

Le PNEDC rassemble les travaux de recherche dans le domaine du climat global et de sa dynamique. Il s'est intéressé aux structures de variabilité qui caractérisent un climat donné, et au potentiel de prévision de ces structures. Il a mis l'accent sur la compréhension des propriétés qui définissent un climat et contribuent à le faire évoluer (variable moyenne et son écart-type, connexions spatiales et temporelles entre régions distantes, modes de variabilité, événements extrêmes). L'approche du PNEDC n'était pas guidée par l'étude d'une composante spécifique (dynamique de l'océan, ou circulation de l'atmosphère...), mais par des questionnements phénoménologiques posés par les observations climatiques : l'intensification de la phase positive de l'oscillation nord atlantique lors des dernières décennies est-elle liée au changement climatique ? Pourquoi le phénomène El Niño n'est-il pas toujours prévisible avec la même fiabilité ? Quels sont les risques de rupture de la circulation thermohaline au prochain siècle et quelles en seraient les conséquences sur le climat de l'Europe ? Les thèmes d'étude couverts par le programme ont été motivés par la phénoménologie du système climatique actuel ; l'approche était globale et transversale (par rapport aux milieux), et des épisodes caractéristiques des climats du passé (événements abrupts, entrée en glaciation...) ont également été étudiés pour approfondir la pertinence et la robustesse des mécanismes d'ajustement climatique.

### Actions et résultats marquants

Une meilleure compréhension des limites de prévision à l'échelle de la saison a été acquise en participant au projet européen Demeter (Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to interannual prediction). Cette approche ambitieuse a montré que la prévision à l'aide d'un ensemble de modèles couplés permettait de mieux cerner les causes d'incertitude et donc d'améliorer la qualité de la prévision. Celle-ci demeure difficile, mais des progrès significatifs ont été accomplis : l'analyse de la croissance d'erreur dans un modèle couplé a montré la sensibilité de la prévision à l'état du système, l'assimilation variationnelle multi variée a été développée et devrait conduire à une meilleure maîtrise de l'initiation océanique, l'importance de la salinité dans le pré conditionnement de l'océan a conforté le développement du Service d'observation-SSS. La prévision saisonnière dépend également d'une meilleure connaissance du fonctionnement de l'atmosphère. Dans ce domaine, des avancées ont été faites sur le rôle des coups de vent dans la région occidentale de l'océan Pacifique dans la phase d'initiation d'El Niño et sur l'importance de la structuration de l'activité synoptique et intra-saisonnière pour le déclenchement et la propagation des anomalies tropicales de grande échelle. Ces questions ont stimulé le développement de recherches théoriques sur le développement et l'organisation de la convection, sur le rôle des interactions avec les surfaces continentales ou maritimes dans l'amplification et la propagation des événements convectifs, questionnements à la base du projet Vasco-Cirene prévu dans l'Océan Indien en 2006, ainsi que du programme Amma en Afrique tropicale.

■ Plusieurs études sur la variabilité tropicale ont mis en évidence l'évolution des caractéristiques de la variabilité interannuelle sur le dernier siècle, montrant que la coïncidence d'anomalies dans la ceinture tropicale, observée par exemple en 1997, était exceptionnelle et que chaque région équatoriale avait un caractère de variabilité propre. Cette mise en phase remarquable

de la dernière décennie du vingtième siècle est-elle une signature du changement climatique ? Les liens entre Enso (El Niño southern oscillation), l'oscillation zonale de l'Océan Indien, la variabilité de la mousson Indienne et de la mousson Africaine, les événements climatiques en Afrique comme en Amérique du Sud ont été explorés à travers les observations et les modèles. Parmi les résultats importants de ces études, notons la prise de conscience grandissante des connexions entre ces régions, et de « modes » lents du système climatique qui sous-tendent le développement d'anomalies saisonnières à interannuelles mais dont la nature et le fonctionnement nous échappent encore.

■ Ce questionnement a motivé la nécessité de mieux représenter l'océan en particulier dans son aptitude à séquestrer l'information atmosphérique via la couche de mélange. Ce travail sur les paramétrisations océaniques, rendu possible par les observations répétées dans des régions clés par les SO (Pirata – SSS), a conduit à une amélioration de la représentation de la couche de mélange, de la température de surface qui est la variable fondamentale dans le contrôle des échanges océan-atmosphère, et de la formation des masses d'eau, en particulier dans les régions australes. La circulation des masses d'eau autour de l'Antarctique demeure un point clé du fonctionnement du système climatique difficile à représenter dans les modèles couplés actuels. Cette région annulaire qui brasse les eaux provenant des trois grands bassins océaniques, ventile les eaux intermédiaires et profondes de ces bassins. L'analyse des simulations numériques a permis de préciser l'importance respective des processus de formation dans chacun des bassins, et a conduit au lancement de nouvelles actions sur le terrain : Bilbo-Flostral dans le secteur Océan Indien, Goodhope dans l'Atlantique sud, et Drake qui s'intéresse à la variabilité de la circulation hydrologique dans le passage du même nom.

■ Ces travaux sur l'hémisphère sud ont été complémentaires à d'autres d'actions importantes du programme focalisées sur la variabilité du climat européen et de l'Atlantique nord. Le climat européen a été l'objet de multiples études, tant dans les modèles que dans les observations et avec des approches diverses et complémentaires. Les ré-analyses atmosphériques ont confirmé l'aptitude des modèles à représenter les principaux modes de variabilité agissant sur l'Europe pendant les 40 dernières années. L'expérimentation numérique a souligné le rôle des connexions avec les latitudes tropicales, et le potentiel de prévision à l'échelle saisonnière à partir de la température de surface océanique. Une action importante, encore en cours, est d'interpréter la prévision saisonnière en terme de régime de temps et donc de risque hydrologique ou de tempête sur l'Europe.

■ Le signal sur l'Europe a également été étudié dans sa partie basse fréquence. La récurrence pluriannuelle des anomalies de température océanique de surface dans l'océan Atlantique et son impact sur la variabilité décennale ont été analysés afin de comprendre les rôles de l'océan et de l'atmosphère dans la persistance des anomalies climatiques. Le programme Ovide a démarré et la campagne 2002 a déjà montré une cellule méridienne de circulation différente de la campagne précédente de 1997. Seule l'observation hydrologique et géochimique à long terme des régions nord Atlantique permettra d'interpréter cette variabilité et de comprendre la circulation des masses d'eau dans le tourbillon subarctique, le rôle des processus de méso échelle dans la formation des masses d'eau, et les temps caractéristiques de cette région clé.

■ Caractériser le fonctionnement climatique de l'Europe et de l'Atlantique nord à l'échelle de la dizaine d'années sur les derniers

siècles a conduit à explorer le potentiel de données historiques (dates de vendange, pluviométrie...) ainsi que l'acquisition et l'interprétation de nouveaux enregistrements (cernes d'arbres, coquillages, coraux...). La reconstitution des grandes caractéristiques du climat européen (gradient nord-sud, gradient est-ouest, périodes de sécheresse ou d'inondation, étude des bilans de masse et d'énergie des glaciers...) est au centre des préoccupations avec l'objectif de remonter aux mécanismes responsables de ces perturbations.

■ Reconstruire la variabilité récente demeure difficile, du fait de la faiblesse du signal climatique par rapport au signal de variabilité synoptique. Aussi essaie-t-on de caractériser la signature spatiale et temporelle du climat européen lors d'événements de grande amplitude, comme les événements abrupts Dansgaard-Oeschger de la dernière période glaciaire. L'analyse du dernier forage du Groenland, à North Grip, permet de remonter aux conditions atmosphériques jusqu'au dernier interglaciaire, et d'avoir une meilleure connaissance du climat européen pendant cette période chaude. L'analyse des carottes glaciaires, des carottes marines dans les différents détroits au sortir de l'océan Arctique, et les enregistrements continentaux, conjuguée à la simulation directe des isotopes dans les modèles permettent de mieux cerner les circulations atmosphériques et océaniques pendant un événement abrupt. L'hémisphère sud a également bénéficié de nouvelles carottes océaniques permettant de mieux décrire le déphasage inter hémisphérique pendant un événement abrupt. L'extension à 8 cycles glaciaires au Dôme C permettra d'étudier avec plus de confiance les mécanismes de couplage entre climat et géochimie pendant l'entrée en glaciation.

■ Le comportement du climat planétaire est étudié par modélisation numérique couplée afin de déterminer les mécanismes de variabilité naturelle, qu'ils soient régionaux ou globaux, et de comprendre quelles sont les régulations du cycle de l'eau et de l'énergie, quels sont les rôles respectifs de l'océan, de l'atmosphère et de la glace, en fonction des échelles de temps. L'accent est également mis sur les interactions entre géochimie et climat, afin d'avancer sur la compréhension de l'évolution du climat dans les prochains siècles. Après les premiers scénarii de changement climatique et de couplage entre cycle du carbone et climat (qui a montré l'effet amplificateur des interactions entre ces composantes), l'accent a été mis sur le développement de nouveaux systèmes de projection du climat global, avec des modèles plus fiables, comprenant davantage de processus. Les composantes « surface continentale » et « hydrologie de surface » ont été testées et améliorées, et couplées avec des composantes océan-glace/atmosphère, également améliorées afin de permettre aux équipes françaises de participer aux exercices de Giec, en assurant la cohérence interne des cycles énergétiques. En parallèle de cet effort de mise en cohérence du système global, des méthodologies originales ont été mises en place pour aborder la régionalisation des changements climatiques.

## Méthodes

Les études de description et interprétation phénoménologiques s'appuient sur de longues séries d'observations. La nécessité d'acquérir des séries temporelles longues et cohérentes souligne le rôle essentiel des services d'observation, en particulier : Pirata, dans l'Atlantique équatorial, et le réseau SSS de salinité de surface et les sections hydrologiques associées dans différentes régions clés du globe, Catch pour l'hydrologie, en Afrique équatoriale. De grandes opérations pluriannuelles ont également été lancées comme le programme Ovide dans l'Atlantique nord, Amma en Afrique de l'Ouest et dans l'Atlantique équatorial ou les opérations de flotteurs de subsurface dans l'Océan Indien (Cirene dans l'Indien équatorial, en complément de Flostral – projet Patom - dans la région du courant circumpolaire antarctique,) qui

contribuent au réseau mondial de flotteurs mis en place dans le cadre du projet international Argo. Les missions spatiales sont également vitales pour l'observation globale des phénomènes et pour l'étude de la variabilité. De nombreux projets s'appuient sur la série temporelle du niveau de la mer obtenue par les satellites Topex/Poseidon, complétée par celle d'ERSI/2, et poursuivie par Jason. L'analyse du comportement de l'atmosphère est basée sur l'observation spatiale, sur les réseaux de radiosondage, malheureusement déclinants, et sur les ré-analyses du Centre Européen et du NCEP sur les derniers 40 ans qui, bien que nécessitant une validation critique par rapport aux mesures de terrain, fournissent un moyen exceptionnel de cerner la cohérence globale et temporelle du système.

■ Une part importante du programme est consacrée à l'analyse des carottes marines ou glaciaires obtenues dans le cadre de grandes campagnes internationales (forages North Grip du Groenland, Epica en Antarctique, programme Images dans l'océan...). Le programme n'a pas financé ces actions internationales majeures qui n'y sont pas évaluées, mais il a soutenu les analyses qui en résultent. Le programme a mis en œuvre un certain nombre d'autres initiatives intéressantes comme les campagnes de prélèvement de coquilles, de coraux, de spéléothèmes...

■ En parallèle de cet effort important sur les observations, la modélisation numérique est un outil d'investigation puissant sur les mécanismes climatiques. Les ressources proviennent de plusieurs centres : Idris, CEA, Météo France et Centre Européen. Notons ici que la difficulté des questions à traiter dans le cadre de la concurrence internationale exige de travailler avec des modèles performants, de résolution spatiale satisfaisante, avec une approche d'ensemble de simulations permettant de prendre en compte, au moins partiellement, le caractère stochastique des écoulements. Nous nous heurtons actuellement à l'insuffisance du travail de prospective en termes de moyens de calcul qui conduit à fortement limiter les ambitions et à rechercher des ressources extérieures (Centre Européen, Earth Simulator...) pour les projets les plus ambitieux et les plus prospectifs.

■ Ces projets ambitieux sont en particulier ceux qui participent au transfert vers l'opérationnel. Le programme a contribué à plusieurs développements importants des modèles : la convection dans les modèles d'atmosphère, la couche de mélange dans les modèles d'océan, et ces avancées sont à transférer dans l'opérationnel. Notons également l'activité très importante en termes de recherche de processus amont sur les limites de prévision saisonnière (saisonnière, couche barrière, salinité, seuil convectif...), et le travail théorique sur les taux de croissance des modes normaux dans le Pacifique équatorial. Enfin, le travail sur l'assimilation variationnelle multi variée doit bénéficier, en terme de méthodologie, à l'opérationnel.

## Insertion nationale-internationale

Les thématiques abordées dans ce programme ont clairement été le reflet de programmes internationaux, Clivar-Pages (Climate variability and predictability-Past global changes), avec mise en exergue de questions auxquelles la communauté s'intéresse particulièrement. Un point important est la sensibilisation précoce de la communauté sur l'aspect intégré du système climatique et donc l'effort mis sur la fermeture des cycles eau et énergie, plutôt que sur l'optimisation du comportement d'une composante particulière. Ce souci va de pair avec le développement des études de rétroaction entre cycle et climat et la prise de conscience que le changement climatique requiert une approche globale et cohérente du problème.

■ Les thèmes de recherche ont été abordés au sein d'une structuration nationale touffue, où participaient plusieurs programmes et organismes nationaux. Ce point est en particulier délicat quand on aborde la question du changement climatique où d'autres instances que l'Insu ont mis en place des structures

incitatives complémentaires et mieux dotées que le PNEDC, demandant de reconsidérer le rôle que pourrait jouer un tel programme à l'avenir.

■ Les équipes françaises dans le domaine des études climatiques sont très bien insérées dans le contexte européen et elles ont participé largement aux travaux du FP5 sur la prévision saisonnière, le changement climatique, l'oscillation nord atlantique, la reconstruction du climat européen, les programmes de forages glaciaires. Cependant, l'évolution vers le FP6 a été délicate compte tenu du degré de structuration institutionnel devant accompagner les projets et de l'effort de coordination demandé aux équipes.

## Forces et Faiblesses

Indépendamment des résultats scientifiques obtenus, le PNEDC a eu un rôle très positif sur la structuration de la communauté nationale, issue de divers organismes, sur la thématique de la dynamique du climat. Il a permis de coordonner la communauté autour de l'utilisation et de la valorisation scientifique des grands moyens (navires océanographiques, mouillages, infrastructure en régions polaires, services d'observation, données satellitaires). Il a facilité la préparation au niveau national de contributions à des projets scientifiques d'envergure internationale soumis aux appels d'offre européens ou internationaux. Enfin il a permis une meilleure intégration entre études expérimentales et études par modélisation.

■ D'une manière générale, l'activité dans ce domaine a besoin de deux approches complémentaires : la mise en place d'actions

concertées d'envergure, demandant la concentration de moyens humains et logistiques importants (deux exemples : la réalisation des scénarios imposés du Giec demande 15000 heures de CPU Idris dans une configuration de basse résolution par rapport aux autres modèles engagés, et la participation aux études de prévision saisonnière n'a pu se faire que par la mise à disposition de la machine du centre européen de prévision météorologique à moyen terme) et en parallèle, le développement d'initiatives originales, largement basées sur la motivation de chercheurs individuels. La structure du programme, adaptée à des projets moyens, ne répond vraiment ni à l'un, ni à l'autre.

■ Quelques difficultés spécifiques :

- ▶ Le domaine d'étude demande, au niveau des observations, des investissements de longue durée (dix ans ...). C'est difficile à gérer dans une programmation annuelle.
- ▶ La discussion des priorités entre commission thématique et commissions gérant des infrastructures (bateaux, mi-lourds, calculs...) devrait être plus harmonieuse.
- ▶ La nécessité d'une approche transversale (interaction géochimie océanique, biosphère continentale, chimie atmosphérique...) hors des frontières du programme.
- ▶ La difficulté de motiver les chercheurs sur des questionnements fondamentaux sur le changement climatique, alors que les aspects applicatifs sont bien financés par ailleurs.
- ▶ Trop de récurrence dans les projets.
- ▶ La nécessité d'accroître l'évaluation internationale.
- ▶ L'insuffisance de l'évaluation contractuelle et à posteriori des projets.

## Processus biogéochimiques dans l'océan et flux (PROOF)

### Objectifs scientifiques

Le programme Proof (Processus biogéochimiques dans l'océan et flux) a été réorganisé en 2002 avec comme priorité l'étude de la réponse des écosystèmes et des cycles biogéochimiques océaniques au forçage physique, inscrite de manière explicite dans le contexte du changement de climat planétaire et de ses répercussions sur le milieu naturel. Cinq contraintes physiques, ou chimiques majeures, résultant du changement du climat planétaire et des perturbations de nature anthropique ont été identifiées :

- ▶ L'augmentation des rejets d'origine anthropique ;
- ▶ L'augmentation de la température ;
- ▶ Les modifications de la circulation océanique ;
- ▶ Les modifications des dépôts éoliens d'origine désertique ;
- ▶ L'augmentation des radiations UV à la surface de l'océan.

■ Trois thématiques de recherches étaient retenues. Elles visaient d'une part à renforcer le potentiel des approches pluridisciplinaires déjà existantes ; d'autre part, elles ambitionnaient de favoriser l'émergence de synergies nouvelles à l'interface de plusieurs disciplines.

#### ▶ Interactions entre changements climatiques et cycles biogéochimiques marins à travers l'interface océan - atmosphère

L'évolution admise du climat global a accru notre besoin de comprendre comment les changements climatiques influencent les processus physiques et biogéochimiques dans le système couplé océan - atmosphère ; en retour, il est nécessaire de comprendre comment ce système couplé rétroagit sur le climat. Cette thématique visait donc à favoriser le regroupement d'océanographes et d'atmosphériciens ayant, notamment, une

expertise sur les gaz "climatiquement actifs", les aérosols, le transfert radiatif et la photochimie. L'objectif était d'améliorer notre compréhension des processus responsables des sources et puits de ces gaz dans l'océan superficiel, leur échange au travers de l'interface air-mer ainsi que leur influence sur la chimie de l'atmosphère.

#### ▶ Les effets respectifs du changement climatique et de la variabilité naturelle sur la structure fonctionnelle des écosystèmes marins et sur les cycles biogéochimiques.

Afin d'aborder les études de rétroaction des cycles biogéochimiques océaniques sur le climat, un préalable est de comprendre la manière dont les communautés vivantes dans l'océan vont "intégrer" les modifications de l'environnement et, en retour, contribuer à la modification des cycles. Ce thème encourageait le regroupement des communautés d'océanographes biologistes, chimistes et physiciens pour comprendre et quantifier la réponse des organismes vivants et des cycles biogéochimiques à la variabilité du forçage physique et chimique.

#### ▶ Les "proxies" paléo océanographiques dans l'océan Actuel

Ce thème de recherche faisait appel au concept de "proxys", c'est-à-dire d'indicateurs (biologiques, géochimiques et sédimentaires) permettant de quantifier (empiriquement) les paramètres climatiques et environnementaux utilisés pour les reconstitutions paléo - climatiques. Ces relations empiriques devaient être dégagées dans l'océan actuel pour les extrapoler ensuite à l'analyse des carottes sédimentaires. Cette thématique regroupait la communauté travaillant sur les cycles biogéochimiques dans l'océan actuel et celle intéressée par la reconstruction de l'évolution passée de l'océan, en particulier de la paléo - productivité.

■ Le programme Proof a également mis en place une charte pour la gestion des données. L'objectif était de mettre à disposition le plus rapidement et plus efficacement possible, d'abord à la communauté concernée, puis à la communauté scientifique dans son ensemble, toutes les données acquises dans les différents projets soutenus par le programme Proof. La présentation de l'ensemble des projets Proof ainsi que les données anciennement archivées ont été regroupées au sein d'un site Proof.

### Trois principaux domaines d'action

Derrière la pluridisciplinarité privilégiée au niveau des thématiques, était également encouragée la diversité des outils pour mettre en œuvre ces recherches. On peut répartir ces outils en trois catégories principales :

#### ■ L'observation *in situ*

Il s'agit essentiellement des recherches pluridisciplinaires menées lors de campagnes océanographiques à partir des navires de façade de l'Insu ou des navires hauturiers de l'Ifremer ou de l'Ipev. Quatre zones-chantiers prioritaires ont été identifiées :

- ▶ La Méditerranée en s'appuyant, en particulier, sur le service d'observation Dyfamed (Dynamique des flux en Méditerranée) (<http://www.obs-vlfr.fr/sodyf/home.htm>) ;
- ▶ L'océan Austral en s'appuyant, en particulier, sur le service d'observation OISO (Service d'observation de l'océan Indien) ;
- ▶ L'atlantique nord-est - Golfe de Gascogne ;
- ▶ L'océan Tropical.

#### ■ Les expérimentations de laboratoire (Apple, Uveco (Ultra violet radiation in marine ecosystems))

L'objectif de ces expérimentations est double : d'une part, elles visent à "démonter" et comprendre, dans le cadre d'un forçage maîtrisé ou contrôlé, les phénomènes observés dans le milieu naturel ; d'autre part, elles permettent de tester des scénarii d'évolution future de certains forçages anthropiques et/ou climatiques et d'en apprécier les effets sur les organismes marins et, finalement, sur les cycles biogéochimiques.

#### ■ La modélisation

La modélisation couplée physique biologie était centrale dans le programme Proof, en considérant explicitement le transfert d'échelles entre la meso échelle, le bassin océanique et l'échelle globale. Cette modélisation tire profit des observations *in situ* ou de télédétection qui fournissent les champs d'initialisation et de validation des modèles. Elle tire également profit des expérimentations de laboratoire qui permettent d'établir la paramétrisation des processus clé.

### Intégration internationale

Les thématiques scientifiques identifiées et soutenues par le programme Proof s'inscrivaient dans les programmes internationaux relevant d'IGBP, du Scor (Scientific committee on oceanic research) ou des deux qu'ils soient nouvellement lancés ou en cours d'élaboration. Ainsi la thématique 1 du programme Proof relèvait du programme Solas (Surface ocean lower atmosphere study). La thématique 2 était en adéquation avec les axes thématiques du nouveau programme Imber (Integrated marine biogeochemistry and ecosystem research). Enfin le thème 3 s'inscrivait dans la réflexion de perspectives menée par le

groupe P'ITT (Paleo-IGOFS Task Team) issu de IGOFS et du programme international Images et était également un des axes de recherche coordonné du projet Géotracés (accepté comme planning group du Scor en 2003).

■ En interagissant de manière constructive avec les comités scientifiques de ces nouveaux programmes d'IGBP, le comité scientifique du programme Proof veille à cette mise en phase des activités nationales et internationales. Cet accompagnement vise à permettre à la communauté française d'améliorer la valorisation future de ses activités sur le plan international.

### Forces et faiblesses

Proof a continué à jouer un rôle extrêmement fort d'intégrateur de la communauté, rôle résultant en particulier de la mise en place et du soutien à des actions ambitieuses sur le terrain. Parallèlement à ce volet de la programmation, Proof s'est gardé la possibilité de soutenir des actions de plus faible envergure, plus ciblées, permettant soit d'obtenir des résultats plus rapidement, soit d'aborder des sujets pionniers et originaux, soit de mener des études très utiles, complémentaires aux grandes actions. Ceci s'est en particulier vu dans le domaine de la modélisation couplée dynamique – biologie à petite et moyenne échelles. L'autre point fort du programme, qui découle en partie du point précédent, a été la très bonne visibilité et intégration de la communauté au niveau international, en particulier grâce aux projets d'envergure, comme Keops et Biosope. Cela s'est concrétisé par ailleurs par une excellente position de la communauté au sein de l'Europe et des programmes de 6ième PCRD. En outre, Proof a permis avec efficacité de faire le lien entre la programmation scientifique nationale et les grands programmes internationaux : sans qu'ils ne soient exclusifs, ces derniers sont en effet toujours explicitement considérés dans la politique scientifique de Proof (IGOFS, puis Imber, Globec). Enfin, un autre point fort de Proof, qui s'est surtout concrétisé ces dernières années, concerne une bien meilleure interaction avec les Sciences de la vie et avec la communauté des physiciens/dynamiciens de l'océan : la communauté SDV utilisant des outils de biologie moléculaire et cellulaire commence en effet à réellement s'intégrer à des problématiques scientifiques « Proof », et les campagnes importantes sur le terrain ont de plus en plus une composante physique très présente, l'exemple le plus frappant étant Pomme.

■ Par contre, certaines faiblesses persistent. En contrepoint au constat précédent, on doit noter que certaines interactions n'ont pas atteint une dimension souhaitable, ou ont même été fortement négligées. L'exemple le plus frappant concerne certainement le lien entre le côtier (Pnec) et le large (Proof). Cela provient certainement en partie du fait que ces deux programmes étaient structurellement et formellement très déconnectés, et qu'aucune réflexion croisée n'a été réellement menée. On peut aussi pointer des faiblesses concernant les échanges et interactions air-mer (programme international Solas, communauté nationale PNCA), la synergie entre les paléo océanographes et les « actualistes » vis-à-vis de l'utilisation de l'outil isotopique. Ces actions sont difficiles à mener et/ou prennent du temps à initier (par rapport à une programmation quadriennale), et les incitations, en particulier budgétaires, ne sont aussi certainement pas à la hauteur. Si l'effet d'entraînement est extrêmement fort, il n'en reste pas moins que le niveau absolu du soutien ne permettait pas de fournir à Proof toutes les armes pour avoir un impact plus important au sein de la communauté.

## Programme national de télédétection spatiale (PNTS)

### Objectifs scientifiques

L'observation satellite est, de nos jours, indispensable à tous les champs de recherche ayant trait à la connaissance de la Terre, de son atmosphère, de son climat, de ses océans. Elle permet une surveillance globale et constante de toutes les composantes de la Terre et offre des données de plus en plus nombreuses, pertinentes et de qualité sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles. Cependant, l'observation satellite ne peut pas être exploitée directement sans travaux préalables à caractère méthodologique.

■ Le PNTS, programme transversal pluridisciplinaire, a pour vocation de soutenir ces développements méthodologiques à caractère exploratoire, qu'ils soient un préalable à la généralisation de l'utilisation des observations spatiales ou une réflexion sur l'extension du champ d'application de la télédétection à des domaines encore inexplorés. Ces développements peuvent se placer avant la définition de nouvelles missions spatiales. Ils interviennent surtout pour préparer une exploitation optimale des nouvelles caractéristiques des capteurs satellitaires. Le programme se situe donc clairement en amont des programmes thématiques.

### Actions et résultats marquants

Parmi les actions soutenues par le programme, nous pouvons citer quelques exemples, non-exhaustifs, qui illustrent l'apport de l'observation satellite à la connaissance de l'océan, de l'atmosphère ou de la cryosphère.

■ En océanographie, l'avènement des missions de gravimétrie a permis la définition d'une topographie dynamique absolue des océans. Les estimations de géoïde à partir de la mission Champ, associées à la surface moyenne océanique déduite de l'altimétrie ont en effet permis de calculer une topographie dynamique moyenne des océans purement satellitale (c'est-à-dire avec une précision indépendante de critères régionaux). La validation sur le Pacifique tropical a montré que ces premières solutions de géoïde permettaient pour la première fois de déduire de l'altimétrie la circulation géostrophique absolue. Ce travail anticipait le potentiel des missions gravimétriques suivantes comme Grace (Gravity recovery and climate experiment) et Goce (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer).

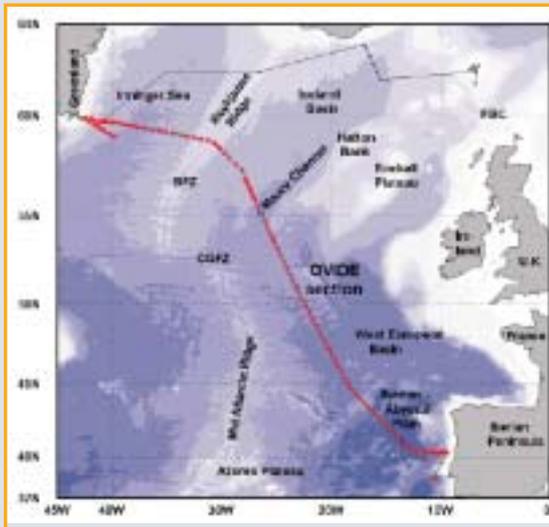
■ En ce qui concerne la biologie marine et la couleur de l'océan en milieu côtier, les avancées les plus marquantes ont porté sur

une meilleure utilisation des observations directionnelles et en polarisation, en particulier pour discriminer les particules minérales du phytoplancton. De nouvelles corrections atmosphériques basées sur une meilleure connaissance des propriétés optiques des particules marines et des aérosols améliorent la restitution des aérosols côtiers et celles des propriétés optiques des particules marines dans le proche infrarouge, ainsi que l'absorption dans ce domaine.

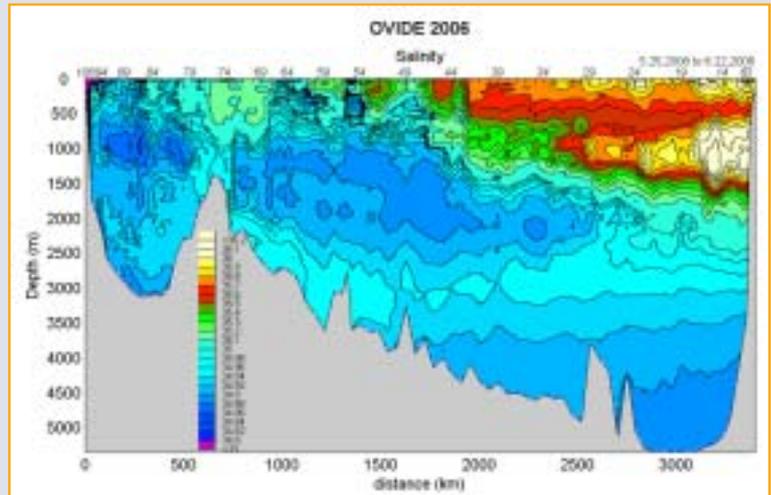
■ En ce qui concerne l'atmosphère, les activités dominantes ont concerné les aérosols et la vapeur d'eau atmosphérique. On peut citer pour exemple le développement, puis la validation, de méthodes qui caractérisent l'aérosol atmosphérique en utilisant les signatures spectrales, directionnelles et polarisées mesurées par Polder. Ces méthodes seront appliquées aux mesures de Parasol, un microsatellite lancé par le Cnes qui fait partie du train Aqua. L'arrivée des mesures du lidar spatial Calipso, a été préparée en utilisant des mesures sol, aéroportées, ou les observations spatiales acquises par les expériences Lite (sur la navette spatiale) ou de l'altimètre laser Glas. Ces travaux préparatoires ont confirmé l'apport de telles mesures pour les études atmosphériques, notamment pour la caractérisation des nuages et des aérosols, soit indépendamment, soit à travers la synergie avec des mesures passives acquises simultanément.

■ Au cours des dernières années, nous avons préparé le développement de méthodes d'analyses multi capteurs passifs (radiomètres et imageurs) et actifs (lidar et radar), anticipant ainsi les possibilités à venir. Une description complète de structures verticales nuageuses et du profil vertical des aérosols passe par une combinaison des mesures des deux types de capteurs. Une telle synergie sera possible très prochainement à travers l'Aqua Train et exploitable très rapidement.

■ Enfin, en ce qui concerne la cryosphère, on peut noter un transfert fécond de méthodologie habituellement utilisée en Terre solide vers l'étude des glaciers ou des surfaces enneigées. L'utilisation des caractéristiques polarimétriques de certains Sar (Synthetic aperture radar) a permis de mieux caractériser le manteau neigeux, ouvrant ainsi une voie pour la restitution de la stratification de la neige. La corrélation d'image appliquée aux images Spot5 des glaciers alpins et de ceux de l'Antarctique a permis une mesure des vitesses d'écoulement de la glace d'une telle précision que le suivi de ces vitesses est maintenant envisageable pour l'étude de l'évolution de glaciers.

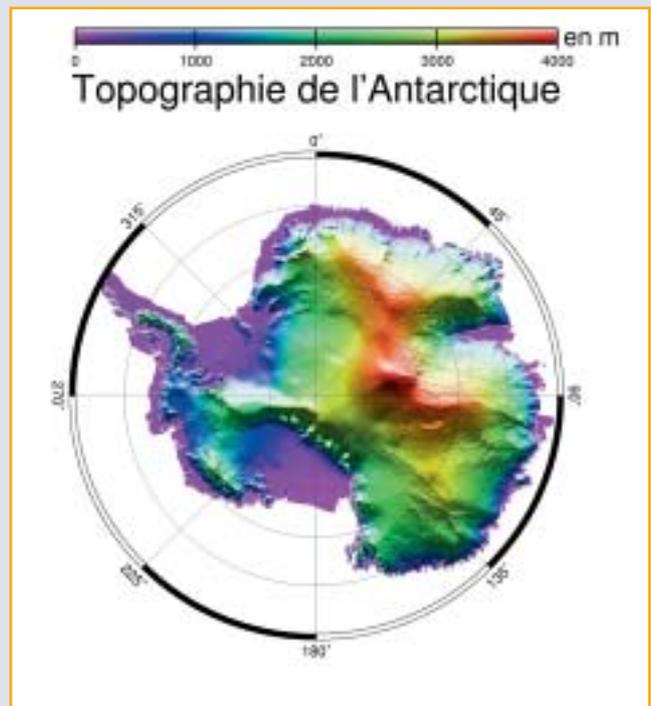


*Expérience Ovide 2006, financée dans le cadre du PNEDC. Profil de salinité (ci-dessous) mesuré en mai et juin 2006 entre le Groenland et le Portugal (Source Ovide).*



*Campagne Biosope du programme Proof. Image au microscope d'un mollusque prélevé dans la colonne d'eau par un piège à particules. © Campagne Biosope CNRS-Ifrermer 2004. Photo Daniel Vaultot.*

*Topographie de l'Antarctique obtenue par l'altimètre du satellite européen ERS. Elle varie de 0 à plus de 4000 m. On voit de très nombreux détails, comme le lac de Vostok, des réseaux hydrographiques, des ondulations sur la surface. © Legos/CNRS/Cnes/IRD/UPS*





*Interface glace-mer-continent, campagne ANTX XIII 3/Drake à bord du Polarstern organisée par AWI. © LOCEAN/CNRS*



*Embouchure de l'Amazone. Les effluents sont transportés très loin de la côte.  
© Image courtesy NASA/GSFC/JPL, MISR Team*

Demande sociétale

Systeme  
Terre

Observation

Modélisation

Interface

Milieux

Impact

Changement  
global

II

Prospective  
Priorités  
et orientations  
scientifiques

Plutôt que de présenter une prospective par champ disciplinaire, les priorités et orientations scientifiques ont été organisées autour de trois questions scientifiques :

- ▶ Réduire les incertitudes sur la modélisation du Système Terre ;
- ▶ Les interfaces ;
- ▶ Les impacts du changement global.

S'est ajoutée une question sur les missions de notre communauté face aux interrogations du citoyen et des politiques, « Quelle science en réponse à la demande sociétale ? », que nous proposons en avant-propos.

La réflexion de la communauté scientifique a conduit à des recommandations sur les moyens à mettre en œuvre, et plusieurs chantiers ont été identifiés (cf Chapitre IV). Enfin, les programmes nationaux maintenant regroupés autour d'un programme « Les enveloppes fluides et l'environnement (LEFE) » ont affiché des objectifs et des priorités scientifiques plus ciblés.

## Avant-propos

# Quelle science en réponse à la demande sociétale ?

La mission de notre communauté scientifique est d'effectuer une recherche fondamentale sur le fonctionnement de l'océan et de l'atmosphère, de leur couplage et leur évolution à différentes échelles de temps et visant à accroître notre niveau de compréhension du fonctionnement du Système Terre. Par ailleurs, compte tenu de ces champs thématiques abordés, cette communauté est, de plus en plus fréquemment, confrontée à une demande sociétale qui émane de différents acteurs et qui concerne les impacts environnementaux des activités humaines.

■ Elle doit donc s'avérer capable de percevoir ces demandes, de les analyser et d'identifier celles pour lesquelles un réel besoin de recherches s'avère nécessaire. Sa mission alors consiste à mener les études amont requises et-ou à élaborer les « prototypes » permettant de démontrer la capacité des outils développés à satisfaire la demande. Elle consiste également à apporter le soutien en expertise lorsque celui-ci est sollicité par diverses institutions et à s'assurer que le public est correctement informé du résultat des recherches menées sur ces questions.

■ Un corollaire de l'implication des chercheurs dans des domaines tels que ceux qui sont évoqués dans ce texte est le retour sur leur propre activité de recherche. On pourrait en citer de nombreux exemples. Ainsi, la recherche fondamentale se nourrit quotidiennement de produits devenus aujourd'hui opérationnels qu'elle a souvent contribué à construire. De même, nombre d'expériences de dégradation de composés chimiques, commandées initialement pour des besoins industriels, ont pu être utilisées pour comprendre les processus contrôlant le devenir de ces espèces, voire d'espèces voisines, dans l'environnement... À l'inverse, la mise en œuvre opérationnelle des outils élaborés par la communauté scientifique doit clairement être assurée par d'autres partenaires.

## Les enjeux

Au cours des dernières années, diverses interrogations concernant le devenir de notre environnement ont conduit le citoyen et ses divers relais politiques, à interroger la communauté scientifique sur les risques naturels et les impacts actuels et futurs des perturbations induites par les activités humaines. Citons, à titre d'exemple, l'évaluation de l'intensité du réchauffement climatique, la prévision des pics estivaux d'ozone dans et autour des grandes agglomérations, l'éventuelle recrudescence des événements cataclysmiques, l'eutrophisation des eaux côtières...

■ Ces questions, lorsqu'on les rapproche des problèmes scientifiques qui les sous-tendent, peuvent être posées en des termes différents : Dispose-t-on des outils opérationnels nécessaires à la surveillance ou à la prévision ? Quels réseaux et quels types de mesures doit-on mettre en œuvre pour remplir ces tâches ? Dispose-t-on de l'expertise suffisante pour fournir aux pouvoirs publics les éléments scientifiques permettant d'apprécier l'effet réel de telle ou telle mesure de régulation de la pollution ? Quelle est la tendance à long terme de tel ou tel phénomène ? Dispose-t-on d'outils technologiques permettant de limiter, voire d'éviter les émissions, éventuellement dangereuses ? Quels sont les véritables risques selon les populations ? Peut-on anticiper des

risques futurs liés au développement technologique ? Quelles sont, aux différentes échelles, les éventuelles conséquences socio-économiques des modifications de l'environnement ?

■ Ceci nécessite donc la maîtrise d'un ensemble cohérent de trois éléments en interaction :

- ▶ Une recherche et un développement technologique de pointe ;
- ▶ La création de normes et de règles de droit ;
- ▶ Des systèmes de détection, de surveillance et de contrôle.

■ Par ailleurs, il est indispensable de disposer d'agents de médiation pour transcrire ces demandes sociétales en questionnements scientifiques perceptibles par la communauté. Un bon exemple de ce type de relais est celui joué par l'ADEME<sup>1</sup> dans de nombreux domaines concernant l'environnement.

## La demande sociétale

Les différentes formes de cette demande peuvent être classées en fonction de leur nature (institutionnelle, industrielle, citoyenne...) et en fonction des échelles auxquelles les problèmes posés doivent être traités (internationale, nationale, régionale, locale).

### La demande institutionnelle

▶ La demande internationale émane d'institutions ou organismes comme l'Union européenne, les Nations unies et divers groupes experts internationaux... :

Elle porte principalement sur l'aide à la définition de cadres législatifs, sur l'élaboration d'outils (modèles, observatoires) nécessaires pour une mise en œuvre opérationnelle de systèmes de gestion de l'environnement. Elle concerne aussi, au travers de groupes comme le Giec, l'établissement de constats de l'état de l'environnement ou de scénarii sur son évolution pouvant conduire à l'adoption de protocoles internationaux et à la surveillance, lors de leur application.

▶ La demande nationale est principalement transmise par les ministères et/ou les agences en charge :

Elle porte également sur le cadre législatif et l'élaboration d'outils. Il existe une demande nationale spécifique en matière d'expertise en soutien le plus souvent aux négociations internationales.

▶ La demande régionale-locale (Conseils régionaux, généraux, municipalités...) :

Sa spécificité est d'adresser principalement des questionnements portant sur des études de cas plus appliqués.

■ Il faut noter qu'à chacun de ces niveaux, il est demandé aux chercheurs de diffuser leurs résultats, non seulement vers leur communauté mais également en direction des décideurs et des citoyens.

### La demande industrielle

Elle émane généralement d'entreprises polluantes ou qui fabriquent des produits polluants, ou encore d'entreprises positionnées sur le marché de l'environnement. Cette demande

<sup>1</sup> Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

semble s'exprimer de façon différente selon la taille des entreprises, les plus importantes réclamant davantage de recherche « amont » que les plus petites qui sont plus intéressées par des études appliquées. La motivation des entreprises trouve sa justification dans la nécessité économique d'anticiper, voire de contrecarrer les réglementations, notamment vis-à-vis de leur positionnement face à la concurrence. Une illustration de ce besoin des grandes entreprises est leur présence dans certains programmes nationaux. Les plus petites souhaitent que les chercheurs apportent davantage leur soutien à des études d'impact liées à leur activité particulière ou à leur activité en tant que bureaux d'étude. Enfin, même si elle est plus éloignée du champ direct des activités de l'Insu, il existe également une demande concernant le développement de techniques propres ou de dépollution (remédiation).

■ Répondre aux questionnements des industriels n'est pas toujours bien abordé et devra être amélioré. Bien sûr, de nombreuses collaborations existent entre scientifiques et entreprises, que ce soit en matière de développement d'instruments, de transferts d'algorithmes voire d'études spécifiques. Néanmoins, du fait de l'absence de point de contact facilement identifiable, certains besoins industriels demeurent

ignorés. Même si tous ne justifient pas nécessairement une implication des scientifiques, ceux pour lesquels des outils ou des compétences existent devraient pouvoir être satisfaits.

### ■ La demande citoyenne

En matière de recherche scientifique, la demande de la société a progressivement évolué d'une demande axée sur davantage de confort (progrès technologique) vers une demande intégrant également une meilleure qualité de vie au sein de laquelle l'environnement est perçu comme un élément déterminant. Cette demande s'exprime de façon protéiforme, le plus souvent indirectement. Elle est, la plupart du temps, relayée par des organisations non gouvernementales (ONG) ou des associations dont le rôle consiste à la porter au niveau politique.

■ Compte tenu de la méfiance actuellement observable vis-à-vis du monde politique et de ses modes d'action, il existe aussi, de la part des citoyens, une demande de plus en plus forte de lien direct avec les scientifiques pour obtenir de l'information aussi indépendante que possible (par exemple sur des sujets comme les impacts sanitaires, la défense du patrimoine, l'évolution de l'environnement, les risques naturels...).

## Réduire les incertitudes sur la modélisation du Système Terre

**L**a réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre est l'objectif d'une large communauté de climatologues, météorologues, glaciologues et océanographes. Visant un degré de réalisme de plus en plus exigeant, le développement de la modélisation s'est traduit par l'enrichissement des modèles en termes de processus et de couplage entre sous-systèmes sur une gamme d'échelle de plus en plus large. De fait, cette sophistication qui prend en compte la mise en évidence de cycles nouveaux ou de nouvelles interactions entre systèmes et améliore la représentation du Système Terre, ne conduit pas à la réduction des incertitudes. Quant à l'incertitude elle-même, elle s'exprime relativement à un objet d'étude dans un contexte spatio-temporel défini. Adaptées à chaque objet, les méthodes de quantification, voire de modélisation des incertitudes et de leur évolution, se développent parallèlement aux efforts pour améliorer la représentation des processus et la compréhension des cycles climatiques. Cette question scientifique sera donc abordée sous trois angles différents et complémentaires :

- ▶ Améliorer et consolider la représentation des processus ;
- ▶ Contraindre le système par un cadre intégrateur et une approche multi échelle ;
- ▶ Quantifier les incertitudes.

### Améliorer et consolider la représentation des processus

La décennie passée a vu arriver à maturité un certain nombre d'outils qui diffèrent dans leur configuration, leur contenu physique ou leur résolution spatiale et qui ont la particularité de couvrir une grande gamme d'échelles spatiales depuis la représentation explicite de la dynamique et du transport à grande échelle, jusqu'à la prise en compte de processus de sous-maille, parfois d'échelle microscopique, comme dans la formation des nuages.

### ■ Des processus mal connus à l'origine d'incertitudes majeures sur les modèles

L'amélioration de la représentation de certains processus est un élément clé des progrès qui pourront être réalisés dans les prochaines années. C'est le cas en particulier de la représentation des processus de couche limite et de convection dans les modèles atmosphériques, ainsi que les processus nuageux, nuages de glace en particulier qui restent une des composantes les plus incertaines du système climatique. Les processus de couche limite et de

convection, ainsi que la dynamique des échanges entre troposphère et stratosphère, sont également critiques pour le transport et la transformation d'espèces chimiques ou d'aérosols dans l'atmosphère. Améliorer la connaissance de l'impact radiatif des nuages et des aérosols reste un enjeu prioritaire.

■ Dans le domaine océanique, les processus de formation des masses d'eau et de mélange restent des points difficiles à résoudre et sensibles aux échelles des modèles, avec là aussi un impact de premier ordre sur le transport de constituants. Le franchissement de barrières énergétiques pose le problème d'intégration d'échelles, de même que le traitement des structures anisotropes comme les courants de couche limite ou le trait de côte.

■ Les surfaces continentales sont une source de limitation importante du réalisme des modèles, notamment l'hydrologie des sols et le transport de l'eau d'un point de vue physique et les processus à l'intérieur de la canopée d'un point de vue thermodynamique. Le traitement des hétérogénéités de sous-maille s'impose pour améliorer leur représentation.

■ La chimie homogène et hétérogène, la microphysique des aérosols et interaction aérosols-nuages dans l'atmosphère, et la biogéochimie dans l'océan ont pris un rôle important tant dans l'étude des variations du climat et des cycles, que dans les applications relatives à la qualité du milieu, chaque processus apportant son lot d'incertitudes auquel s'ajoutent celles qui sont liées à la représentation de leurs interactions.

■ Les constatations décrites ci-dessus conduisent à dégager un certain nombre de pistes.

### ■ Le triptyque observation *in situ*, modélisation explicite, paramétrisation

La consolidation et l'amélioration du réalisme des modèles passent par un travail de fond sur la compréhension des processus et sur leur représentation. Pour que de réels progrès puissent être réalisés, il est de première importance de soutenir une recherche de pointe sur l'amélioration de la représentation des processus physiques et dynamiques.

■ Grâce à la montée en puissance des moyens de calculs, certains processus comme la convection et les précipitations orageuses ou orographiques, comme les tourbillons ou les courants côtiers dans l'océan, peuvent maintenant être représentés explicitement dans des configurations réalistes. Cette modélisation explicite offre une gamme complète d'outils pour avancer dans la compréhension d'un processus jusqu'à sa représentation dans les modèles de grande échelle. Cela repose sur la confrontation aux

observations pour lesquelles trois approches complémentaires sont ouvertes :

#### ► Observations et modélisation explicite

Le lien entre l'observation *in situ*, l'observation à méso échelle par télédétection et la paramétrisation peut se faire par la modélisation explicite des processus. Cette approche, qui a déjà fait ses preuves dans des projets internationaux comme Eurocs ou GCSS (Gewex cloud system study), est particulièrement bien adaptée à l'exploitation des résultats d'une campagne de terrain comme Amma. Pour résoudre certaines difficultés rencontrées en modélisation, les modélisateurs du climat doivent participer à la définition de grandes campagnes expérimentales.

#### ► Mieux utiliser les séries ponctuelles à long terme

Une approche alternative, pertinente pour exploiter de longues séries de données *in situ* et de télédétection, consiste à sélectionner les observations d'un côté et les résultats de modèles de l'autre en fonction de caractéristiques spécifiques, de façon à isoler des situations où un processus particulier domine. Cela rejoint les propositions développées dans la partie « interfaces ».

#### ► Contribuer à l'évolution du système satellitaire

Le recours aux données satellitaires de nouvelle génération (géostationnaires à haute résolution, satellites à défilement avec télédétection active...) offre des perspectives considérables pour l'amélioration des paramétrisations et la communauté du climat doit s'investir dans la définition des missions spatiales.

## Contraindre le système : un cadre intégrateur et une approche multi échelle

### ■ Eléments du contexte : changement et variabilité climatique

Le système climatique évolue sous l'influence de facteurs d'origine anthropique (comme le forçage radiatif associé aux émissions des gaz à effet de serre (GES) et à l'injection d'aérosols émis par la combustion des ressources fossiles et de la biomasse), ou d'origine naturelle (comme les variations de l'insolation dues aux perturbations de l'orbite terrestre, les changements du flux d'énergie solaire ou les injections de poussières volcaniques dans la stratosphère). Les variations du système climatique peuvent également être d'origine interne comme le phénomène El Niño ou les fluctuations de la circulation thermohaline. Les fluctuations décrites par les observations résultent d'une combinaison entre variabilité forcée et variabilité interne, et sont

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

associées à des constantes de temps d'échelles différentes. Depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines exercent une perturbation sans précédent sur les cycles biogéochimiques, et si l'océan aura absorbé l'essentiel de la perturbation fossile dans quelques millénaires, reste que la végétation et l'océan vont réagir fortement à cette perturbation dans les siècles à venir.

■ Réduire les incertitudes sur l'évolution future du système climatique passe par la compréhension des phénomènes qui contrôlent la variabilité du climat et du cycle du carbone, ainsi que leur interaction mutuelle. De nombreux questionnements en déclinent : Quels sont les mécanismes qui régissent les fluctuations des modes de variabilité dominants, et quelles sont les tendances de ces modes sur le prochain siècle ? L'équilibre des régions polaires est-il menacé ? Quel est le rôle de la stratosphère sur la variabilité troposphérique, sur la chimie de l'ozone, les aérosols ? Quels sont les processus sous-jacents et les régions sources et puits du CO<sub>2</sub> anthropique ? Existe-t'il de « mauvaises surprises » sous forme de rétroactions qui conduiraient à une accumulation incontrôlée du CO<sub>2</sub> ou à un effondrement de la circulation thermohaline et par conséquent, à un changement climatique amplifié ?

### ■ Méthode de travail

L'étude de l'évolution future du climat et des cycles est fortement coordonnée au niveau international par le WCRP (World climate research programme) et le Giec. La méthode de travail retenue consiste à réaliser des simulations à partir de scénarii standard autour desquels sont ensuite déclinées des simulations de sensibilité propres aux différentes investigations. Les travaux actuels sur la fourchette d'incertitude reposent sur deux méthodologies différentes. La première vise à étudier comment un processus spécifique et sa représentation dans le modèle, comme les nuages des basses latitudes, influence la structure et l'amplitude des changements climatiques. La deuxième propose l'exploration systématique à l'aide de méthodes Monte-Carlo d'un large éventail de valeurs de paramètres dans une approche physique stochastique. Dans cette démarche, la modélisation joue le rôle central, mais la stratégie n'est pas optimale en raison des contraintes inhérentes à nos concepts actuels :

- ▶ Les données instrumentales et des reconstructions paléoclimatiques sont sous-utilisées ;
- ▶ Les interactions d'échelle spatiale et temporelle sont insuffisamment étudiées ;
- ▶ Les méthodologies mises en œuvre sont dispersées ;
- ▶ Enfin la hiérarchie des modèles utilisés manque de synergie.

■ La stratégie d'approche doit évoluer par la mise en place d'un cadre intégrateur qui permette d'avoir une vision intégrée et cohérente des modèles, des

données et des synergies possibles et par la mise en œuvre d'une approche multi échelle, aussi bien spatiale que temporelle, de la variabilité climatique.

■ L'analyse de base de données multi modèles, comme celle qui est mise en place pour la préparation du dernier rapport du Giec, permet de caractériser un processus, ou une sensibilité particulière, dans un espace de phase très grand créé par la diversité des résultats de modèles jouant un même scénario. Cette approche permet de mieux cerner l'aptitude d'un modèle particulier à appréhender une phénoménologie spécifique, en fonction de sa représentation du climat. Des études complémentaires sont nécessaires pour préciser la dépendance entre un phénomène particulier et l'environnement climatique dans lequel il se produit. Les climats des derniers millénaires, et d'autres situations plus anciennes caractérisées par un environnement différent de l'actuel, permettent d'explorer la sensibilité climatique et la dépendance entre climat et variabilité dans des conditions contrastées par rapport au climat actuel. Les observations sont, bien entendu, le complément indispensable à ces études : elles tracent l'impact d'un phénomène spécifique dans l'environnement climatique et pour les périodes plus récentes, elles vont jusqu'à la caractérisation même du phénomène en lien avec son environnement.

■ Dans le développement de ce cadre intégrateur, les études de détection et d'attribution ouvrent des pistes prometteuses en rassemblant de façon cohérente modèles, données et erreurs associées, afin de démontrer la capacité d'un modèle à simuler un signal forcé, anthropique ou naturel, détecté dans les observations. La quasi-totalité de ces études a porté pour l'instant sur la période instrumentale et sur la tendance de la température à l'échelle globale. Elles doivent maintenant être étendues aux échelles régionales de variabilité plus rapides, ainsi qu'à de nouveaux champs, comme le niveau de la mer ou les événements extrêmes. L'extension de ces études aux climats du passé peut se faire sur des périodes clés, où il est possible d'identifier et de séparer les forçages climatiques en s'appuyant sur des reconstructions paléoclimatiques quantitatives. L'application de ces méthodes est également envisageable pour des simulations climat-carbone réalisées avec une hiérarchie de modèles. Cette approche soumettra nos modèles à un ensemble de contraintes dérivées d'une gamme d'observations extrêmement variées, ce qui permettra de mieux appréhender les processus sous-jacents à la variabilité climatique et de réduire les incertitudes sur les projections futures.

### ■ Amélioration des données et des modèles

Les principaux ingrédients des méthodologies de détection et attribution sont les données et les modèles. L'amélioration des modèles est discutée

dans la partie précédente. Pour les données, quatre chantiers sont devant nous :

- ▶ La pérennisation des systèmes d'observation actuels afin d'augmenter la durée de la période d'observation instrumentale ;
- ▶ L'extension spatiale et temporelle, et l'amélioration des bases de données sur la période instrumentale ;
- ▶ La calibration des proxies utilisés pour reconstruire les changements climatiques passés ;
- ▶ La reconstitution des forçages (émissions, activité solaire, volcanisme).

## Quantification des incertitudes

La quantification des incertitudes sur les projections climatiques et les prévisions des systèmes modélisant la planète Terre nécessite de séparer la prévisibilité intrinsèque du système naturel étudié de la capacité des modèles existants à effectivement prévoir les fluctuations, ainsi qu'à estimer l'incertitude qui entoure telle ou telle évolution. La première notion suscite depuis longtemps des actions de recherche à caractère fondamental qu'il faut clairement continuer à soutenir. Des méthodes crédibles pour évaluer la seconde notion sont apparues récemment dans quelques domaines opérationnels, mais elles suscitent encore de nombreuses questions.

### ■ État de l'art en assimilation de données

L'assimilation de données joue un rôle essentiel vis-à-vis de l'incertitude de la modélisation, non seulement parce qu'elle est à la base de nombreux systèmes d'initialisation de l'atmosphère et de l'océan, mais aussi parce que certaines méthodes d'assimilation s'appuient directement sur des statistiques d'erreur des modèles de prévision et des systèmes d'observation, et offrent ainsi le cadre mathématique pour la détermination de la sensibilité d'une simulation à son état initial, ou à ses paramétrisations. C'est la meilleure intégration possible, à un moment donné, de toutes sortes d'observations et d'informations variées, produisant ainsi le jeu de données composite et synthétique le mieux adapté à toute analyse portant sur l'ensemble d'un système.

■ L'ensemble modèle-observations-opérateur d'observation, utilisé aujourd'hui en assimilation de données, offre un cadre complet pour la validation, dans la mesure où il s'organise en une mesure de distance entre champs simulés et observables, qui tient compte des forces et des faiblesses de chaque composante, et qui est de plus encadrée par des critères théoriques permettant de mesurer, ou de converger, vers la cohérence statistique de ces composantes (le tout formant un « système d'optimalité »). L'assimilation

de données fera d'ailleurs l'objet d'une action de recherches identifiée en tant que telle.

### ■ Approches d'assimilation pour les systèmes couplés

La mise en œuvre d'approches intégrées (observations-assimilation-modélisation) pour les systèmes couplés, considérés dans leur globalité, constitue une piste originale et importante qui doit être explorée. La démarche classique qui consiste à coupler les différentes composantes du système, contrôlées séparément par des observations de leurs propriétés respectives, introduit des sous optimalités susceptibles de dégrader les mécanismes de couplage et de réduire la pertinence des simulations couplées à vocation prévisionnelle. Il convient de développer de nouvelles approches qui intègrent explicitement les mécanismes de couplage.

### ■ Assimilation multi échelle

Les systèmes de prévision numérique atmosphériques ou océaniques mettent en œuvre une cascade de modèles à différentes échelles. Ils devront, à terme, être capables de prendre en compte ces différentes échelles de modélisation avec la définition sous-jacente de notions d'échelles caractéristiques associées aux observations et aux modèles. La nature des observations et leur densité spatio-temporelle doivent être considérées en regard des capacités des modèles à intégrer l'information assimilée. Il s'agit aussi de rechercher des combinaisons optimales des cycles d'assimilation aux différentes échelles.

### ■ Méthodes d'assimilation avancées

Explorer le potentiel des méthodes existantes s'impose en développant les opérateurs appropriés pour les observations non encore assimilées. Des efforts soutenus concernant la paramétrisation fine des statistiques d'erreur dans les schémas existants sont à poursuivre, notamment par l'intermédiaire d'approches adaptatives en parallèle au développement de méthodologies nouvelles.

■ Enfin, il faut assurer la coexistence d'approches connues (estimation statistique optimale et contrôle optimal), voire leur hybridation, et développer de nouvelles approches fondamentales pour prendre en compte les comportements statistiques non-gaussiens, les processus dynamiques à seuil ou non-linéaires comme la condensation ou la convection profonde et les contraintes d'inégalités (concentrations positives) inhérentes aux variables des modèles.

## Recommandations et moyens à mettre en œuvre

Soutenir les activités de développement des outils de modélisation en mettant en place un soutien

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

approprié en personnel et en fonctionnement pour assurer le développement des codes et développer les capacités de calcul. De même, soutenir les efforts nationaux dans le cadre de ceux qui sont effectués à l'échelle internationale, en particulier pour ce qui concerne la standardisation des méthodes de couplage et développer des systèmes d'assimilation adaptés au couplage.

■ Renforcer la démarche *expérimentation-modélisation explicite-paramétrisation-transfert d'échelles-tests dans les modèles de grande échelle*. Cela passe par l'implication des modélisateurs dans la définition des grandes campagnes de terrain et les missions spatiales.

■ Pérenniser l'obtention des observations ; étendre le concept à la co-localisation de données variées ; améliorer les bases de données ; améliorer la

couverture spatiale et temporelle sur des périodes clés des climats passés ; travailler à la reconstitution des forçages climatiques ; structurer la communauté nationale pour formaliser les besoins supplémentaires en ré-analyses, par exemple pour les événements extrêmes.

■ Favoriser les études de détection et d'attribution pour développer un cadre intégrateur et une approche multi échelle ; les étendre à de nouvelles échelles de temps et d'espace, de nouveaux paramètres et des périodes clés du passé.

■ Mettre en place des systèmes *modèles-observations-opérateurs d'observation* ouverts et modulaires pour la recherche et l'opérationnel, et assurer les formations sur les outils techniques correspondants ; développer la possibilité de couplage et d'échange grâce à des normes communes.

## Les interfaces

**L**es systèmes dynamiques ouverts de notre environnement (atmosphère, océan, cryosphère, biosphère, fonds océaniques...) évoluent en réponse d'une part aux transformations et transports internes à chaque milieu, et d'autre part aux sources et puits, parmi lesquels on distingue les flux aux interfaces. Nous définissons ici les interfaces comme les lieux caractérisés par de forts gradients - voire des discontinuités - de matière ou d'énergie, entre les compartiments du Système Terre ou au sein de ces compartiments.

■ Les échanges aux interfaces jouent un rôle majeur dans les bilans, tant en ce qui concerne les bilans d'énergie (thermodynamique, cinétique) que de masse (eau, constituants chimiques ou biologiques) : leur intensité, sens et évolution dans le temps et l'espace conditionnent en grande partie la variabilité de ces compartiments, avec des incidences notamment sur l'évolution temporelle des systèmes et donc du climat. Le lien indissociable entre flux, bilans et processus doit être étudié de façon coordonnée, en tenant compte des différentes échelles spatio-temporelles.

■ Les interfaces sont aussi des lieux d'interaction entre les processus physiques, chimiques et les organismes vivants. Ces interactions peuvent affecter l'interface elle-même et modifier en retour les flux échangés. Enfin les interfaces sont souvent des lieux de transformation en plus d'être des lieux d'échange de matière et d'énergie, ce qui requiert d'étudier les deux de façon conjointe. Des recherches pluridisciplinaires permettront de comprendre et modéliser les échanges associés aux interfaces.

### Problèmes scientifiques et questions prioritaires

#### ■ Hydrodynamique des interfaces et impact sur les bilans d'énergie et de masse, et (dans l'océan) sur la biologie

Améliorer la connaissance de l'hydrodynamique aux interfaces (couches limites, zones frontales...) et son impact sur la biologie et la chimie de l'océan, ou sur la formation des sédiments, reste primordial. Lorsque les interactions avec des phénomènes ondulatoires (e.g. ondes internes de marée dans l'océan) et/ou avec la bathymétrie, le relief ou la rugosité de surface (e.g. milieux urbains) jouent un rôle majeur, elles doivent faire l'objet d'études spécifiques.

#### ■ Les régions côtières

Les panaches d'eau douce à la sortie des estuaires des fleuves jouent souvent un rôle majeur sur l'hydrodynamique, la biologie et la géochimie des eaux côtières et les échanges vers les marges océaniques. Il est donc nécessaire de mieux connaître la dispersion de ces panaches et leur interaction avec la circulation locale, ainsi que de quantifier les échanges dans la couche de fond au débouché des fleuves, surtout pendant les événements intenses (crues). Plus généralement, il est fondamental de mieux estimer l'impact des apports continentaux dans les modifications de flux biogéochimiques côtiers et océaniques. Cet objectif requiert l'étude du lien continent-océan par une approche globalisée depuis les bassins versants jusqu'au milieu marin côtier et

hauturier. Un progrès significatif résultera du couplage des mesures relatives aux flux de particules (chimie et transformation) et de leur dynamique à méso échelle. Une attention particulière sera portée aux événements extrêmes (80 % des éléments en phase particulaire sont transportés pendant les crues).

#### ■ *Les marges océaniques*

L'hydrodynamique dans la région des marges (plateau et talus continental) a un impact majeur sur la circulation générale de l'océan. De plus, les marges sont un maillon essentiel du trajet « Continent-Océan-Sédiment » car elles sont « perméables » pour la matière et les éléments chimiques. Il est donc fondamental de comprendre l'impact de l'hydrodynamique sur le transport des matières en suspension et des espèces chimiques et biogéochimiques vers le large. Quel est le devenir des éléments dissous et particuliers exportés via la marge et subissant une dilution plus ou moins rapide dans l'océan hauturier (entraînement par les courants de bordure, transit au sein d'une masse d'eau isolée...) ? Quel est l'impact de ces espèces chimiques sur les écosystèmes pélagiques et/ou benthiques, le sédiment profond ? Par ailleurs, la variabilité climatique affecte aussi les marges : comprendre les flux échangés avec l'océan hauturier requiert d'estimer l'impact de cette variabilité sur le côtier.

■ La pente continentale a une importance particulière de ce point de vue, en tant que zone d'échange entre les domaines hauturier et côtier. À la dynamique hauturière viennent s'ajouter les interactions avec le fond, les forçages atmosphériques locaux, les ondes d'inertie-gravité. Par leur complexité, mais aussi à cause de leur position de frontière, ces régions sont restées peu étudiées et pourtant, l'exactitude de leur représentation conditionne la validité des modélisations dynamiques et de transports de matière.

#### ■ *Couche mélangée océanique et couche limite atmosphérique marine*

La couche mélangée océanique est fortement influencée par les échanges air-mer et peut également affecter les conditions dans la couche limite atmosphérique. C'est aussi un lieu essentiel de vie. Améliorer les connaissances de la variabilité de la stratification et du mélange vertical dans cette couche mélangée océanique permettra de mieux quantifier l'impact de la dynamique sur l'activité biologique et le transport de particules.

■ Les mesures par télédétection fournissent une signature de surface des processus qui ont lieu au sein des deux milieux ainsi que des échanges à l'interface : il est donc essentiel de progresser sur les relations entre processus et signal télédétekté. C'est en particulier important pour l'interprétation de la mesure de salinité de surface qui sera fournie par la mission spatiale Smos (initiative française).

■ Au-dessus de la surface, la paramétrisation des échanges est encore mal représentée dans certaines conditions (stratification stable, vents très faibles ou très intenses, fort état de mer), auxquelles il convient d'apporter une attention particulière. Par ailleurs, il reste à mieux quantifier les échanges dans les conditions hétérogènes (ex : zones marginales de glaces).

■ Les échanges de particules à l'interface océan-atmosphère modifient les propriétés physico-chimiques de l'atmosphère et de l'océan. Il est donc important d'étudier ces flux de particules et leur lien avec les conditions hydrodynamiques proches de l'interface. Il en est de même pour les échanges de gaz et plus particulièrement la pénétration du CO<sub>2</sub> atmosphérique vers l'océan. Il est en effet indispensable de mieux comprendre et documenter les échanges de CO<sub>2</sub> entre réservoirs sur de larges gammes d'échelles spatio-temporelles, afin de réduire les incertitudes sur les modèles d'évolution du climat.

#### ■ *Interactions océan-glaces australes*

La stabilité des « ice shelves » immergées des régions australes est un paramètre sensible aux effets du réchauffement climatique. Il s'agit d'estimer les échanges de chaleur et d'eau douce liés à la fonte et dérive des icebergs. La compréhension des mécanismes d'ablation ou d'accrétion à la base des calottes glaciaires, et de ceux qui régissent leur écoulement rapide est indispensable à la prévision des variations du niveau des mers au cours des prochains siècles.

#### ■ *Couche limite au fond de l'océan*

La couche limite de fond océanique est un des lieux de dissipation de l'énergie des courants et des ondes d'inertie-gravité, et d'échanges d'éléments entre la colonne d'eau et le sédiment. La connaissance de la variabilité spatiale du mélange vertical dans des régions telles que plateau, talus continental ou ride océanique, mérite des travaux supplémentaires. Par ailleurs, il est urgent d'améliorer la mesure et la paramétrisation des échanges de matière qui dépendent de la tension de fond et des caractéristiques du sédiment.

■ Le plancher océanique est aussi le siège de circulation de fluides hydrothermaux (« chaud » comme « froid »), ayant pour conséquence des apports et départs d'éléments chimiques. Les recherches induites par ce type de questions, encore très exploratoires, permettront de déterminer les flux et les processus physico-chimiques et bactériens propres à ces milieux extrêmes.

#### ■ *Couche limite atmosphérique continentale (CLA)*

La priorité des prochaines années devrait porter sur des études de turbulence et de paramétrisation des flux turbulents dans les conditions mal connues :

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

conditions hétérogènes, atmosphère polaire, atmosphère très stable... Des études plus ciblées sur l'influence des caractéristiques de la couche limite atmosphérique sur la dispersion des polluants ou particules, ou sur le bilan hydrique (notamment en région urbaine), sont également nécessaires.

■ Les mesures par télédétection des surfaces continentales fournissent une signature de surface des échanges entre atmosphère et végétation ou sols. Un enjeu majeur de ces prochaines années est la prise en compte explicite des hétérogénéités dans l'observation et la modélisation des flux. L'échelle du paysage (de la petite région) devra être privilégiée, car les interactions entre compartiments et entre processus y sont particulièrement fortes : organisation spatiale de la végétation, redistribution latérale des écoulements, rôle de la topographie à petite échelle sur les échanges surface-atmosphère, couplage des cycles de l'eau et du carbone. C'est également à cette échelle que l'action de l'homme est la plus prégnante.

■ La mission spatiale Smos (Soil moisture and ocean salinity) fournira prochainement une estimation de l'humidité de surface à moyenne échelle. Pour en tirer profit, il est nécessaire de développer des recherches sur la représentativité spatiale de la mesure, les questions d'agrégation ou désagrégation d'information et la modélisation atmosphère-végétation-sol pour décrire les bilans hydriques de surface. Le développement de méthodes d'assimilation des données de télédétection multi spectrales (visible, infrarouge, micro-onde) dans les modèles de surface doit être poursuivi pour accéder à l'estimation et la spatialisation régionales de variables lentes des écosystèmes terrestres (biomasse, eau du sol profond) qui affectent la dynamique de la couche limite atmosphérique.

### ■ Les particules et leur interaction avec le milieu environnant

Parce qu'elles peuvent être arrachées, déposées et redistribuées les particules peuvent modifier les propriétés des interfaces. Elles sont aussi un vecteur essentiel d'éléments organiques et minéraux.

■ Dans l'océan, la dynamique d'agrégation-désagrégation des particules issues de la re-suspension, des estuaires, des apports à la surface de l'océan, de leur transport ultérieur (couches néphéloïdes par ex.) conditionne leur évolution ultérieure. Il est donc important de mieux connaître ces processus. La diagenèse (c'est-à-dire les transformations biologiques et chimiques subies par le matériel sédimentant) agit comme une source et un puits d'éléments, et est donc un terme essentiel pour équilibrer les bilans. Il est donc indispensable de quantifier son rôle sur la composition chimique de l'océan, mais aussi sur les transformations des espèces chimiques et isotopiques utilisées comme proxies paléo océanographiques afin de rendre plus fiables l'interprétation de ces derniers.

■ Dans l'atmosphère, quantifier l'arrachement des aérosols par les processus d'érosion, leurs transports et dépôts est fondamental et cela pour tous les types d'aérosols (anthropiques, marins, biogéniques ...)

### ■ De l'étude des processus à la modélisation

Les processus décrits ci-dessus ont tous a priori un impact sur les bilans de masse, d'énergie et d'éléments au sein des compartiments de la planète fluide. Cet impact peut être radicalement différent selon le processus et l'échelle spatio-temporelle considérés et intégrés dans un modèle.

■ Un des enjeux de nos communautés est de savoir hiérarchiser l'importance des différents processus aux interfaces afin de proposer des choix de paramétrisation pour la modélisation, selon les échelles considérées. Les hétérogénéités des milieux entre lesquels s'échangent les flux (par ex : milieux côtiers près des fronts ou en présence partielle de glace) sont autant de facteurs de complexité qui affecteront ces choix. Une validation des choix effectués est possible à posteriori, via des diagnostics permettant d'évaluer la cohérence entre bilans et flux dans chaque compartiment.

■ Les non-linéarités affectant les processus et couplages sont identifiées de longue date. Les prendre en compte dans la modélisation est primordial. Cela implique de développer de nouveaux algorithmes, des coupleurs numériques et des méthodes d'initialisation adaptés pour ces modèles.

■ Résoudre ces deux questions est crucial pour passer d'une échelle de mesure, d'analyse ou de modélisation à une autre. Un autre enjeu sera de mieux déterminer la capacité intégratrice des proxies. Dans ces objectifs, le dialogue entre expérimentateurs et modélisateurs, ainsi qu'entre les différentes disciplines, y compris avec les disciplines de base, doit être renforcé.

■ Le développement d'une démarche cohérente intégrant l'analyse des observations locales, la modélisation explicite des processus à l'échelle locale et la paramétrisation de ces processus de manière à les intégrer dans des modèles de plus grande échelle est nécessaire. C'est par cette démarche également qu'il faudra s'efforcer de généraliser les résultats obtenus sur des sites particuliers, à une classe d'interfaces ou d'objet.

## Recommandations et moyens à mettre en œuvre

► Développer des méthodes (observations, modélisations, outils statistiques) permettant de caractériser et prendre en compte la variabilité des processus (pour appréhender l'échelle diurne comme pluriannuelle).

- ▶ Documenter des zones critiques souvent sensibles aux événements extrêmes ; cela implique des mesures régulières et adaptées, et de renforcer l'automatisation des capteurs. Dans l'océan, l'utilisation de vecteurs automatisés déployables rapidement, comme les gliders ou les AUV, est très prometteuse. De même, faire évoluer la gestion actuelle des avions et navires côtiers pour favoriser une meilleure réactivité et un couplage avec les systèmes d'alerte serait bénéfique.
- ▶ Favoriser une approche expérimentale *in situ* (campagnes ou sites ateliers) multi-paramètres et multi-disciplines en ciblant sur des zones clés identifiées, comme la région méditerranéenne. Cette

démarche favorisera le rapprochement entre expérimentateurs et modélisateurs. Elle peut aussi induire le développement de systèmes, plates-formes ou vecteurs multifonctions, d'appareils de mesures chimiques et biologiques à haute résolution embarquables et d'instrumentations dédiées à l'observation de l'interface elle-même.

- ▶ Renforcer la télédétection spatiale qui permet de suivre les conditions thermodynamiques ou biologiques de surface à moyenne ou grande échelle de façon répétitive, complétant ainsi les mesures *in situ*. À cet égard, les projets relatifs aux observations aéroportées visant à améliorer la connaissance de la théorie de la mesure devraient être encouragés.

## Les impacts du changement global

**P**ar changements globaux, ou changement environnemental planétaire, il faut entendre l'ensemble des modifications de différentes natures (climat, composition de l'atmosphère, désertification, eutrophisation, pollution, érosion de la biodiversité et des habitats...) qui, en affectant les écosystèmes aquatiques et terrestres de notre planète, altèrent sa capacité à y soutenir la vie.

■ Le défi principal quant aux impacts des changements globaux actuels et futurs tient dans notre capacité à développer des recherches qui puissent simultanément identifier et mesurer pour un ensemble de régions distinctes :

- ▶ L'évolution des différents forçages environnementaux (T, UV, dépôts, pH...) liés à des perturbations anthropiques à distance (émissions gaz-aérosols...) ou d'origine plus locales (engrais, aménagements, utilisation-prédation des ressources...);
- ▶ Les réponses des écosystèmes et de leurs composantes (physiques, chimiques, biologiques) à la conjugaison de ces différents forçages.

■ Comprendre et modéliser ce système complexe (Earth System Science) implique un effort accru de structuration, de coordination et d'intégration des actions de recherche à différents niveaux.

■ La nécessaire pluridisciplinarité, expérimentée dans de nombreux programmes de l'Insu, doit être confortée et évoluer vers l'interdisciplinarité. L'association des compétences disciplinaires est essentielle pour analyser et modéliser la diversité des forçages en jeu, et celles des réponses des écosystèmes étudiés. L'interdisciplinarité doit se développer pour être capable notamment d'explicitier et modéliser les liens entre forçages et réponses et d'intégrer les échelles spatio-temporelles de leurs réalisations.

### Le contexte des recherches sur les effets des changements globaux au sein de la communauté océan-atmosphère (OA)

Dans le domaine OA, il est indispensable de poursuivre des recherches génériques qui sont à la base de notre capacité d'étude des causes et des conséquences des changements globaux : scénarii d'évolution climatique, chimie atmosphérique et stratosphérique, circulation océanique, cycle de l'eau, cycles biogéochimiques...

■ Elles devront prendre en compte les études des processus aux interfaces, l'aspect « changement d'échelles » et de régionalisation nécessaires à la plupart des études des différents forçages, et les modalités d'expression des processus conduisant à des phénomènes événementiels.

■ Ces recherches doivent s'interfacer dans des programmes pluridisciplinaires pour améliorer notre vision globale des différents forçages, leurs intensités relatives, leurs connections, et les effets en cascade qui peuvent en résulter. Elles doivent déboucher, à l'exemple du climat, sur l'élaboration de scénarii d'évolution intégrée de ces forçages applicables à différentes échelles spatio-temporelles. Si certains de ces forçages ont des effets directs sur les systèmes océaniques (e.g. climat ou CO<sub>2</sub>), d'autres ont des effets indirects via les surfaces continentales (e.g. flux d'eau et de nutriments) et impliquent l'établissement de travaux conjoints avec les communautés scientifiques travaillant sur les surfaces et interfaces continentales.

■ La compréhension de la sensibilité et des capacités d'adaptation-résilience des systèmes « naturels » et

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

« anthropisés » à ces changements globaux constitue une priorité indissociable de la précédente. La pluridisciplinarité est également indispensable pour comprendre comment la structure et les fonctions des systèmes vivants se modifient en référence à des changements plus ou moins rapides de leur environnement.

■ En pratique, ces recherches nécessiteront de s'appuyer sur des observations à caractère continu (réseaux, services d'observation, mesures spatiales), des observations spécifiques (expérimentations, campagnes à la mer) et des développements en modélisation couplée et en interactions modélisations-observations-expérimentations. Bien entendu, ces couplages impliquent le développement de modèles ou d'imbrications de modèles permettant d'aborder les échelles régionales ou sous-régionales et prenant en compte les interactions (par exemple surface-atmosphère ou surface-océan) à ces échelles.

■ Dans ce contexte, il serait nécessaire de centrer les actions sur les écosystèmes les plus sensibles aux changements globaux, que ce soit en référence à leurs caractéristiques intrinsèques et/ou aux biens et services qu'ils procurent *sensu lato*, en prenant soin d'intégrer les perturbations environnementales en synergie avec la prédation directe anthropique, surpêche dans les écosystèmes marins par exemple.

■ Les ateliers du colloque de Lille ont conduit à identifier plusieurs zones prioritaires : la Méditerranée, les régions polaires et tropicales et plus génériquement les interfaces zones côtières et hauturières. Les projets coordonnés qui sont envisagés pour chacune de ces zones sont présentés dans le chapitre « Grands Projets coordonnés ».

### Problèmes scientifiques et questions prioritaires

#### ■ Thématiques spécifiques

L'Insu mène des recherches amont sur le système océan-atmosphère et surfaces et interfaces continentales indispensables pour les études d'impacts. Il doit absolument garder et développer son savoir faire. Il est en effet clairement de la responsabilité de l'Insu de soutenir la mise à disposition des scénarii d'évolution climatique, correctement analysés par les modélisateurs du climat, auprès de l'ensemble des communautés s'intéressant aux impacts directs ou indirects du climat. La question centrale est celle de la caractérisation et de la quantification de la sensibilité du système climatique et de ses composantes interactives à différentes échelles de temps en réponse à différents forçages. L'estimation des incertitudes *sensu lato* associées aux changements climatiques est indissociable de cette question.

■ **Pour la chimie atmosphérique en général**, qui a, bien sûr, aussi des conséquences sur les systèmes vivants, il faut développer nos connaissances sur les émissions de polluants et leur devenir dans l'atmosphère, ainsi que sur nos capacités à en prédire la dynamique à long terme. Des actions prioritaires doivent être engagées sur la pollution atmosphérique dans les basses couches de l'atmosphère, notamment à ses échelles de perception locale (qualité de l'air), et sur les processus et facteurs de contrôle (aérosols, physique et chimie des nuages). Concernant la chimie à l'interface troposphère-stratosphère (UTLS), qui peut elle-même entraîner des conséquences sur le rayonnement ultra-violet reçu à la surface de la Terre et donc avoir des effets néfastes sur la santé des populations humaines et des écosystèmes, les bilans d'ozone et les mécanismes de contrôle associés constituent une priorité.

■ **Les interactions et la dynamique des enveloppes fluides** de la planète sont à l'origine des transports et des échanges entre les milieux constitutifs de notre planète. Les besoins en recherche concernent d'une part les processus relatifs aux perturbations météorologiques et leurs interactions avec les surfaces océaniques et terrestres, et d'autre part les processus concernant l'évolution de la cryosphère (glace de mer, calottes, glaciers, permafrost...), de la circulation océanique et les transports associés à différentes échelles spatio-temporelles. L'étude des systèmes couplés (atmosphère-océan-glace-continent), de leurs interactions et de leur variabilité temporelle sous différentes latitudes, est fondamentale pour améliorer nos capacités de prévision à long terme.

■ L'impact d'un changement climatique sur la frange côtière revêt un enjeu sociétal tout à fait singulier compte tenu de l'accroissement des populations le long des littoraux. À ce titre, caractériser à des échelles régionales et locales les conséquences de ce changement global sur les processus dynamiques affectant le milieu physique apparaît fondamental. Il s'agit de percevoir l'impact de vagues plus hautes et plus fréquentes, de niveaux extrêmes de la mer plus élevés, de pluies plus intenses et fréquentes... sur les caractéristiques des aléas littoraux comme le recul des côtes sableuses, phénomènes par excellence d'échelle événementielle, le recul des falaises meubles ou de roches tendres, le colmatage des zones abritées telles les baies et autres estuaires.

■ L'ensemble de ces forçages physiques et chimiques se répercutent sur les écosystèmes marins, les communautés biologiques qu'ils abritent, les cycles biogéochimiques et les ressources qui leur sont associés. D'autres forçages d'emprise plus locale mais non moins importants affectent également ces écosystèmes : ceux qui sont issus des actions de l'homme prédominant sur les surfaces continentales et leurs interfaces marines, mais aussi ceux qui résultent d'activités d'exploitation des ressources

marines ou d'aménagement du littoral. Les questions prioritaires concernent : la compréhension et la quantification des réponses des organismes vivants, de leurs assemblages fonctionnels et de leurs interactions à la variabilité et à l'évolution de leur environnement ; les conséquences induites sur le fonctionnement des cycles biogéochimiques des éléments majeurs et des éléments en traces. Les interfaces que constituent notamment les marges continentales et la couche d'échange air-mer sont des sites d'étude privilégiés malgré la complexité et la diversité des processus impliqués dans la régulation essentielle des flux de matière et de gaz.

### ■ Thématiques transverses

Si les thématiques spécifiques doivent constituer l'ossature principale des actions de la communauté océan-atmosphère (OA) dans le domaine des changements globaux, elles doivent être accompagnées d'actions transversales soit pour générer des avancées dans des domaines méthodologiques partagés (e.g. modélisation) soit pour participer à des projets conjoints dont le contour thématique et géographique comprennent non seulement l'océan et l'atmosphère mais aussi nécessairement les surfaces et interfaces continentales (SIC). Ici l'identification et la quantification des processus clef propageant les changements globaux au travers des interfaces est un enjeu majeur à décliner.

■ En référence aux changements globaux, et à l'image de la démarche développée par le programme international ESSP (Earth System Science Partnership), il est indispensable que la communauté océan-atmosphère associée à celles des Surfaces et interfaces continentales apporte ses connaissances et ses compétences pour le développement de projets conjoints avec d'autres disciplines et qui concernent :

#### ■ Le cycle de l'eau et la quantité et la qualité des ressources en eau

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 surface (évapotranspiration, flux de chaleur sur les océans).

■ Notons cependant que l'amélioration des paramétrisations des nuages et de la convection n'est pas encore suffisante pour corriger les défauts des modèles météorologiques et de climat (biais du bilan radiatif, précipitations, etc.). Les missions spatiales en cours et prévues (A-Train, Megha-Tropiques, Earthcare) visent à mieux quantifier les effets des nuages stratiformes et convectifs, et les précipitations associées. Par ailleurs, l'exploitation des mesures spatiales pour l'hydrologie est encore loin de l'opérationnel, et l'on attend de la mission Smos des progrès significatifs (en complément à la mission

gravimétrique Grace) sur la quantité d'eau disponible dans les sols, et son devenir.

■ Pour améliorer la modélisation du cycle de l'eau, il faudra également réduire les incertitudes sur les flux aux interfaces, et en particulier, sur les océans. Actuellement, les paramétrisations utilisées ne sont pas adaptées aux modèles de grande échelle et le flux de chaleur latente reste trop imprécis (incertitude d'environ  $30 \text{ Wm}^{-2}$ )

■ 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*, télédétection 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). Le besoin de mieux comprendre le cycle de l'eau tropicale ne s'arrêtera pas avec ce projet, et une extension de la démarche aux autres régions de mousson et à d'autres régions éco-climatiques (Méditerranée, pôles) est à envisager.

#### ■ Les ressources alimentaires et notamment celles qui sont issues du milieu marin

L'enjeu est d'identifier, quantifier et modéliser les principaux processus écologiques qui jouent un rôle dans la dynamique des ressources renouvelables marines exploitées. Les changements globaux ont des répercussions importantes sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins, dont on ignore l'incidence à moyen et long terme hypothéquant l'exploitation future des ressources marines, et de la sécurité alimentaire. La surexploitation des ressources (effondrement de ressources et changement de régime des écosystèmes...), le réchauffement global (accroissement des températures et modification de la distribution et composition spécifique des écosystèmes...), ou encore l'accroissement des émissions de  $\text{CO}_2$  conduisant à une modification profonde des habitats (acidification des océans et son incidence sur le plancton...), sont autant de changements globaux dont les conséquences peuvent être quantifiées et modélisées. De nombreuses modélisations ont été développées dans les écosystèmes et se sont attachées à comprendre l'hydrodynamique tridimensionnelle ou la dynamique d'interaction entre les niveaux trophiques inférieurs, ou encore celle des niveaux trophiques supérieurs. Ces modèles ont été développés par des communautés scientifiques distinctes qui ont produit des modèles aux résolutions spatiales et temporelles différentes et souvent avec des problématiques scientifiques distinctes. L'intégration de connaissances et de modèles apparaît comme une priorité qui nécessite :

► Des études de processus intégrées, permettant l'identification, la quantification et la paramétrisation des contrôles des diverses composantes de l'écosystème (via des expérimentations en laboratoire, mésocosmes, de l'analyse de données ou modélisation) ;

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

► Le développement de modèles couplés (intégrés ou forcés) notamment les modèles hydrodynamiques, NPZD (production primaire) et écosystémiques (production des niveaux trophiques supérieurs incluant poissons, oiseaux, mammifères marins et pêcheurs) permettant de relier les processus aux changements à grande échelle observés (« patterns » tels les changements de régime) ;

► Le développement de bases de connaissance sur les écosystèmes marins ayant vocation à capitaliser, intégrer et diffuser les connaissances acquises par les divers programmes de recherche passés, présents et à venir (présentant données, outils, méthodes et savoir faire dans chacun des écosystèmes) pour répondre aux questions posées par l'approche écosystémique des pêches qui est requise au niveau international.

■ Cette intégration scientifique a démarré au niveau européen avec la création du réseau d'excellence Eur-Oceans. Ce réseau regroupe 60 instituts provenant de 25 pays (2005-2008). Elle mérite d'être confortée au niveau français en mobilisant la communauté scientifique autour de questions scientifiques communes soulevées par les grands patterns émergents (changement de régime, modification de la structure des écosystèmes...).

■ D'autres impacts ne peuvent également être étudiés qu'en interaction avec d'autres disciplines, comme la santé et le devenir des populations humaines à travers les impacts climatiques directs et indirects, mais aussi via le potentiel de la diversité biomoléculaire ou, comme les émissions des composés à effet radiatif (gaz à effet de serre dont le CO<sub>2</sub>, aérosols), en relation avec le développement mondial et les choix des différentes filières énergétiques. La nouvelle structuration favorisera ce type d'études transverses.

■ En dernier lieu, il importe également de souligner que des secteurs entiers restent à étudier : ainsi en est-il des impacts et interactions du changement climatique sur et avec la consommation et la production d'énergie, les transports et le tourisme. Ces derniers points doivent être inclus dans une prospective Insu à 10 ans.

### Recommandations et moyens à mettre en œuvre.

Il est fondamental de mettre en place une stratégie d'interfaçage entre les études des facteurs de ces changements et celles des systèmes impactés. La structure de programmation initiale mise en place, résultant de la prise de conscience du changement climatique dans la dernière décennie, a abouti à des programmes qui n'ont pas suffisamment favorisé les échanges entre disciplines. Le programme GICC (Gestion et impacts du changement climatique) du MEDD apparaît comme un bon exemple qui a permis le développement d'un dialogue entre des

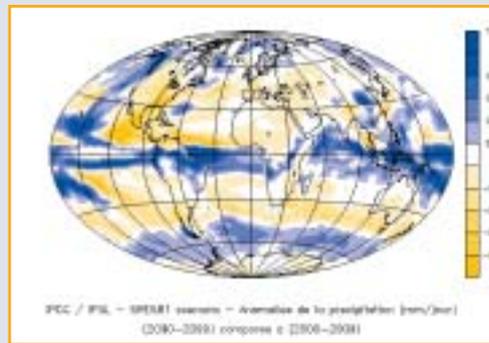
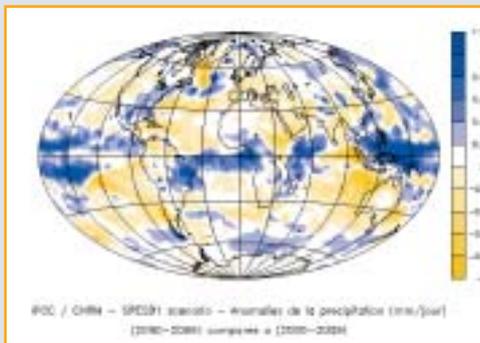
communautés variées. Toutefois, GICC, qui est et reste très orienté par la demande sociétale, ne développe de ce fait que des approches finalisées, s'appuyant sur un corpus de connaissances plus fondamentales, que l'Insu se doit donc d'accroître dans un esprit d'interdisciplinarité, tel qu'il a déjà été évoqué. La mise en œuvre d'actions concrètes impliquant une réelle interaction entre communautés, spécialistes des sciences de la vie, des sciences humaines et sociales etc., est indispensable.

■ L'Insu doit continuer à assumer son rôle dans la modélisation indispensable du climat. Mais la modélisation ne doit pas se limiter aux phénomènes climatiques : elle doit s'étendre aux échelles plus fines que nécessitent les études d'impact, et permettre la prise en compte de systèmes faisant intervenir des disciplines ne relevant pas stricto sensu des domaines habituels d'activité de l'Insu. Il est crucial que l'Insu adapte ses programmes aux besoins croissants du secteur des effets des changements globaux, qu'ils soient d'origine climatique ou d'une autre nature.

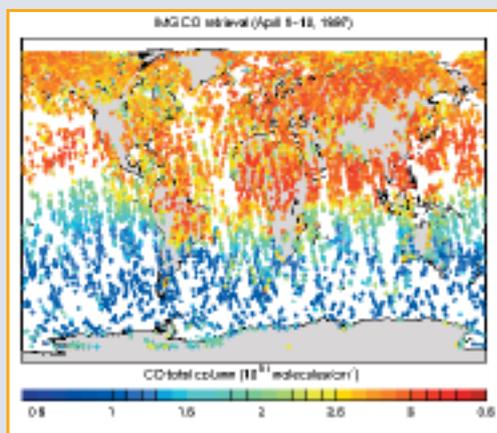
■ L'Insu doit continuer à soutenir les moyens mis en place pour le suivi des évolutions (Services d'observation et ORE), s'assurer du bon fonctionnement de ces services et de leur adéquation à l'étude des causes et conséquences des changements globaux et éventuellement suggérer des regroupements. Il faut aller vers une observation des systèmes à l'échelle régionale, tant pour le domaine marin que pour le domaine terrestre, en regroupant des moyens d'observation et d'expérimentations variés, mais standardisés et si possible automatisés.

■ Les pôles thématiques développés en coopération Cnes-Insu doivent permettre, par l'accessibilité des bases de données qu'ils continuent à enrichir, une meilleure interaction entre spécialistes de la télédétection de paramètres climatiques, modélisateurs et spécialistes des secteurs impactés. Les études spécifiques à favoriser concernent des systèmes particuliers et leur couplage avec les changements globaux. Des efforts doivent donc être portés sur l'observation et la modélisation de ces systèmes, ce qui est l'un des objectifs de GMES (Global monitoring for environment and security). Quant à l'observation spatiale, elle a, bien entendu, un rôle à jouer dans l'étude des effets des changements globaux et de leurs régionalisations. Il est à noter qu'une demande existe pour de la très haute résolution (dans le cas des études des impacts côtiers et urbains, par exemple). Il est tout aussi essentiel de travailler sur les transferts d'échelle entre haute et basse résolution.

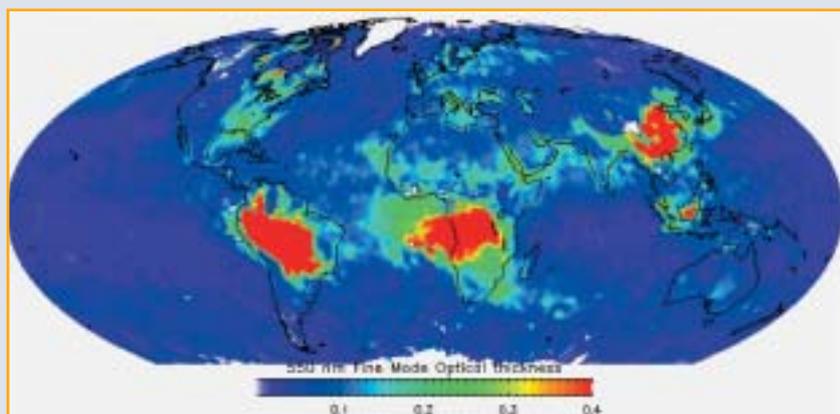
■ Une réflexion sur la mise en place d'un programme pluri et interdisciplinaire sous l'égide de l'Insu autour des changements globaux (ou changement environnemental planétaire) doit être approfondie.



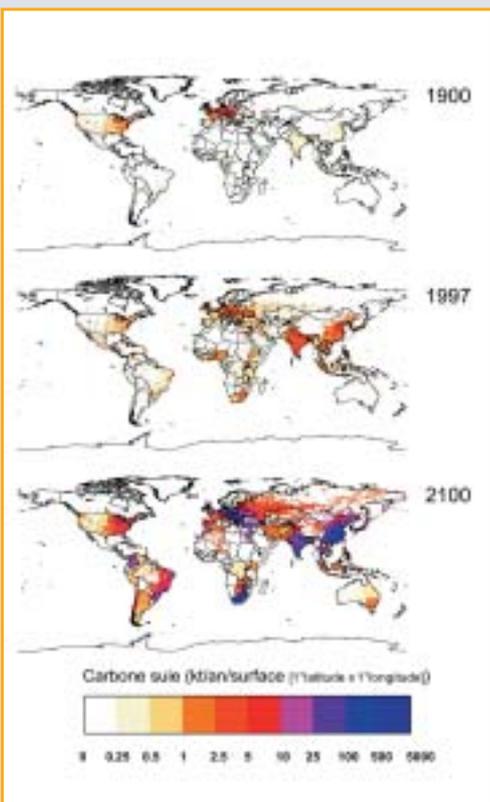
**Distribution géographique des changements de précipitations entre le 21<sup>ème</sup> siècle et la fin du 20<sup>ème</sup> siècle dans le cas du scénario B1 de l'IPCC (émissions faibles). © CNRM/IPSL**



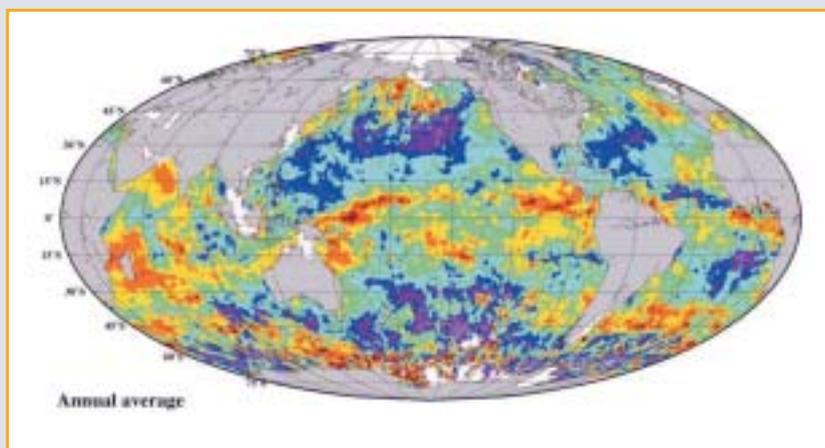
**Concentration de CO total mesuré entre le 1 et le 10 avril 1997. ©TDR**



**Épaisseur optique d'aérosols de petites tailles ( $r < 0,5\mu\text{m}$ ) produits par la pollution et les feux de forêts, mesurés en septembre 2005 par l'instrument polder à bord du microsatellite parasol. L'ordre de magnitude est proportionnel à la quantité totale d'aérosols dans la colonne d'air. © Cnes/LOA/LSCE/IPSL/Icare**



**Modélisation de la distribution globale des émissions de carbone suie en 1900, 1997, 2100 avec le scénario A2 de l'IPCC. © LA/OMP, LSCE/IPSL**



**Évolution de la concentration en chlorophylle (logarithme) observée entre 1998 et 2002 par SeaWiFS aux observations faite entre 1079 et 1983 par CZCS. Antoine et al. JGR 2005**

## Grands projets coordonnés

### La région méditerranéenne

La région méditerranéenne constitue un lieu privilégié pour l'étude des couplages océan-atmosphère-hydrologie-écosystèmes. Un bassin océanique quasi-fermé, une orographie marquée sur son pourtour, un climat très contrasté et une forte urbanisation sont des particularités géographiques qui donnent au domaine méditerranéen une complexité particulière. Les interactions et rétroactions des différents domaines de ce bassin jouent un rôle prépondérant sur les dynamiques géophysiques et biologiques ; elles sont aussi à l'origine d'événements extrêmes qui affectent particulièrement les régions méditerranéennes : pluies intenses et crues en automne, surcotes, vents violents et fortes houles associées ou non aux cyclogenèses méditerranéennes, sécheresse avec feux de forêt comme corollaire en été.

■ Les discussions menées à l'occasion de cet exercice de prospective ont mis en évidence que la plupart des questionnements scientifiques et axes de recherches prioritaires identifiés dans les chapitres précédents de ce document s'appliquent en particulier à la Méditerranée. Plus précisément, des questions scientifiques importantes se posent concernant : les processus aux interfaces (océan-eau douce, couche limite océanique-couche limite atmosphérique, marges océaniques, ...), la compréhension et représentation des processus au sein de chacun des compartiments (processus de couche limite, nuages, convection, ...), la régionalisation climatique, l'impact des changements anthropiques et climatiques sur cette région très vulnérable. Parallèlement, la demande sociétale y est forte. Elle porte sur une meilleure identification des zones à risques (zones inondables par exemple) et un meilleur système de prévision avec alertes plus précises pour aider à la gestion des risques.

■ L'aspect pluridisciplinaire, ainsi que les leçons tirées de projets divers antérieurs sur la Méditerranée ont poussé la communauté à proposer une initiative coordonnée multidisciplinaire sur cette région.

■ Une des composantes de ce projet viserait à améliorer notre compréhension du « cycle de l'eau sur le bassin méditerranéen », en considérant les différents compartiments (océan, atmosphère, surfaces continentales) et leurs couplages. Le bilan hydrologique du bassin méditerranéen serait examiné plus particulièrement sous deux angles : celui des « événements extrêmes » et celui de la « régionalisation climatique » du changement global. Le pourtour méditerranéen est en effet une région particulièrement soumise à des événements extrêmes et il est important de mieux comprendre les processus

dynamiques et physiques du système couplé qui conduisent à la formation de ces événements intenses ainsi que leurs effets parfois irréversibles sur le bilan hydrologique et le milieu naturel (biogéochimie, écosystèmes, érosion des littoraux, ...). Le développement d'une approche par régionalisation climatique du réchauffement global s'impose quant à elle par la forte composante topographique de la région et son impact sur les échelles des processus dominants. Le changement climatique doit aussi être analysé dans le contexte d'anthropisation de la région ainsi que ses conséquences sur le milieu naturel. Une structuration de la communauté est en cours de mise en place autour de ces axes, et un projet expérimental est en cours de définition avec des périodes d'observation entre 2009 et 2012.

■ Une autre composante de cette initiative sera dédiée aux impacts de phénomènes climatiques et hydrodynamiques sur la production et la transformation des espèces chimiques et biologiques dans la zone d'interface entre le côtier et le large.

### Régions polaires

Les régions polaires sont particulièrement vulnérables au changement climatique induit par les activités humaines. Le changement climatique est déjà visible dans le grand nord, et va très rapidement bouleverser ses écosystèmes fragiles.

■ Quel est le devenir de la banquise arctique ? La circulation océanique est-elle en train de se modifier suite à la fonte des glaces ? Comment les calottes et les glaciers polaires vont-ils contribuer à la hausse du niveau des mers ? A quelle échéance la couche d'ozone va-t-elle se reconstituer ? Plus généralement, quel est l'impact de l'homme sur le changement climatique et la pollution en régions polaires ? Enfin la déstabilisation des zones englacées est-elle susceptible d'entraîner l'irréversibilité de ce changement climatique ?

■ Ces grandes questions scientifiques et sociétales sont au cœur des objectifs de l'Année polaire internationale (API, 2007-2008) qui va être l'occasion unique de mobiliser simultanément plusieurs milliers de scientifiques provenant de plus de 50 nations. Nous reprenons ici les points sur lesquels les travaux de la communauté française vont se focaliser.

### Océans

Les océans polaires jouent un rôle spécifique dans l'équilibre et l'évolution du climat de notre planète. Moteurs de la circulation thermohaline de l'océan

mondial, via notamment les sites de formation d'eau dense, ils sont les acteurs essentiels de la redistribution de la chaleur à la surface du globe. Par ailleurs, de par leur dynamique propre, et notamment la présence de glaces marines, ces régions froides sont impliquées de façon primordiale dans les variations de salinité de l'océan, dans les échanges de chaleur et de gaz (vapeur d'eau, dioxyde de carbone...) avec l'atmosphère ainsi que dans le cycle du carbone. Pourtant, du fait des conditions extrêmes qui les caractérisent, ces lieux clés pour l'étude des impacts du changement climatique restent largement méconnus, rendant nécessaires des efforts d'observation sur le terrain et la mise en place de moyens dédiés. Les projets proposés par la communauté française océan-atmosphère visent, dans un cadre coopératif international, à mieux comprendre et contraindre :

- ▶ les flux d'eau, de chaleur et de matière qui constituent les courroies de transmission entre les régions polaires et le reste de l'océan mondial au travers de passages clés (Passage de Drake, passages au sud de l'Afrique et au sud de l'Australie) ;
- ▶ la formation de l'eau antarctique de fond dans le secteur de la Terre Adélie ;
- ▶ la dynamique des sels nutritifs et des métaux traces et leur impact sur la structure des écosystèmes pélagiques dans l'océan Austral ;
- ▶ les interactions atmosphère-océan-glace de mer dans les deux océans polaires.

## ■ Atmosphère

Les régions arctiques sont une zone clé pour le cycle du CO<sub>2</sub>, les aérosols naturels ou anthropiques y jouent un rôle essentiel et mal connu sur le climat, la pollution créée en particulier par les métaux lourds s'accumulent dans les organismes vivants. Le projet international Polarcat abordera tous ces aspects par une approche transversale qui s'appuiera sur un programme expérimental incluant mesures régulières *in situ* des espèces chimiques, des aérosols, des flux de CO<sub>2</sub> et des métaux lourds dans plusieurs stations. Plusieurs périodes de mesures intensives, hiver/printemps 2007 ou 2008 (brume arctique, photochimie) et été 2008 (feux de biomasse) sont programmées avec plusieurs avions, un navire et l'utilisation en temps réel des observations depuis l'espace. L'analyse des données satellitaires ainsi que la modélisation couplée chimie-aérosol-climat permettra l'évaluation des variations interannuelles et leurs impacts sur le climat.

■ Dix-huit ans après la signature du Protocole de Montréal, la destruction de l'ozone en Arctique devient aussi importante que celle observée en Antarctique qui avait déclenché cette décision politique. A l'heure actuelle, la reconstitution de la couche d'ozone à la suite du protocole est encore incertaine et, parallèlement, les effets de la destruction se font plus

que jamais sentir. Le programme Oracle-O<sub>3</sub> a pour objectif l'étude extensive de l'ampleur et des délais de reconstitution de l'ozone stratosphérique, l'impact de l'augmentation des rayonnements UV liés à la perte d'ozone ainsi que les boucles rétroactives ozone-climat. Pour la partie expérimentale, le projet s'appuie sur les données sol des stations existantes en Arctique et en Antarctique, des campagnes de mesures impliquant des instruments embarqués sur avions et ballons, ainsi que sur des données satellitaires, notamment celle du lidar spatial de Calipso. Par ailleurs, l'intégration des données, notamment l'assimilation des observations et les études de processus par modélisation permettront de prédire l'évolution de la couche d'ozone et les possibles rétroactions sur le futur climat polaire.

## ■ Calottes polaires et glaciers

Parallèlement à une meilleure connaissance de l'état actuel et de l'évolution récente des glaciers et calottes polaires, il faut continuer à exploiter le potentiel extraordinaire des archives glaciaires pour une meilleure compréhension de notre système climatique. Pour ce faire, la communauté française d'étude des calottes polaires souhaite poursuivre et élargir la synergie des efforts internationaux amorcés à l'échelle européenne au cours des derniers 10 ans. L'API coïncidera avec le déploiement du programme international Ipics (International partnership for ice core science), regroupant tous les pays ayant une implication dans l'analyse de carottes de glace issues de glaciers ou de calottes polaires. Les objectifs d'Ipics sont de fédérer, optimiser et combiner les savoirs-faire logistiques et scientifiques dans 4 objectifs principaux :

- ▶ caractériser la variabilité naturelle spatiale et temporelle du climat ;
- ▶ identifier à très haute résolution temporelle les mécanismes des changements climatiques rapides se produisant lors de la dernière déglaciation ;
- ▶ l'obtention d'un forage antarctique couvrant 1.2 millions d'années, pour comprendre pourquoi la dynamique du climat a changé brutalement il y a 800 000 ans et quel a été le rôle des cycles biogéochimiques ;
- ▶ l'obtention d'un enregistrement complet de la dernière période interglaciaire au Groenland (projet international Neem).

## ■ Climat tropical

L'étude des phénomènes tropicaux présente un intérêt scientifique majeur lié à l'importance de ces régions en tant que source d'énergie pour l'océan et l'atmosphère, aux rétroactions qui s'y produisent, entraînant une sensibilité du climat global aux phénomènes tropicaux. Elle répond aussi à des motivations appliquées importantes, liées aux processus et aux impacts du changement global dans ces régions, en relation avec le cycle de l'eau. Par

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

exemple, la fréquence et l'intensité des cyclones tropicaux ou l'occurrence de sécheresses prolongées sont susceptibles d'évoluer. Les problèmes des ressources en eau dans ces régions sont graves ainsi que leurs conséquences économiques ou sociales, par exemple sur l'agriculture ou la santé. Plusieurs disciplines sont concernées par ces études, entre lesquelles des interactions doivent se développer. Ces interactions se sont mises en place pour le programme Amma, qui mobilise une importante communauté interdisciplinaire. Beaucoup d'équipes impliquées dans Amma poursuivront leurs efforts dans le domaine du climat tropical et de ses impacts, en élargissant les études à l'ensemble des tropiques. La cohésion de cette communauté doit être maintenue autour de projets coordonnés. L'expérience spatiale Megha-Tropiques, dont le lancement est prévu en 2009, est un des points focaux pour la mise en place de tels projets. Les efforts doivent porter sur plusieurs thèmes :

▶ *La variabilité et la sensibilité climatique* grâce à l'étude de longues séries, avec la construction d'indices climatiques (Glaciers andins et himalayens, coraux, ...) et l'étude des principales rétroactions dans différentes transitions climatiques (naturelles ou anthropiques).

▶ *Les variations du climat sur les dernières décennies*, faisant appel à l'analyse-réanalyse des séries de données *in situ* et spatiales. On cherchera en particulier comment dégager le signal anthropique de la variabilité naturelle.

▶ *La prévisibilité saisonnière et climatique* est d'une très grande utilité pour les régions tropicales (prévision des moussons par exemple). Une analyse approfondie

des prévisions d'ensembles est nécessaire, ainsi que des efforts pour l'assimilation océanique.

▶ *Les interactions surfaces continentales-atmosphère* jouent aussi un grand rôle dans ces prévisions. Il faut donc y prendre en compte l'état des surfaces continentales.

▶ *Les interactions d'échelle*, qui interviennent dans les couplages océan-atmosphère et continent-atmosphère sont également à prendre en compte pour les échelles temporelles.

▶ *Des processus fondamentaux* en région tropicale, comme les interactions physique chimie dans la convection, le couplage biochimie océanique-thermodynamique, la dynamique des ondes équatoriales, ...

▶ *Les paramétrisations* de la convection, de la couche limite atmosphérique et de la couche mélangée océanique ont un rôle très important dans ces régions.

▶ Enfin, le domaine des impacts nécessite le renforcement des liens amorcés avec d'autres communautés sur des points précis, tenant compte de la spécificité des régions tropicales : moussons, cyclones, ressources en eau, agriculture, santé.

■ *Les besoins au cours des prochaines années* concernent le soutien à l'exploitation des données acquises pendant les campagnes de mesure, la mise en place de projets intégrés pour l'exploitation et l'analyse des données (satellites, campagnes, données météo), en interaction avec la modélisation, le soutien aux bases de données correspondantes, la mise en œuvre de campagnes limitées et ciblées sur des thèmes précis. Ces soutiens peuvent se situer en partie dans le cadre de l'accompagnement des programmes spatiaux concernés.

## Prospective des milieux

**A** côté de ces questions intégratrices qui intéressent une communauté scientifique très large, les objets d'étude que sont l'atmosphère et l'océan nécessitent également des études plus spécifiques que ce soit au niveau de la modélisation ou de l'observation de phénomènes particuliers.

### Chimie atmosphérique

Il est désormais établi que les activités humaines ont altéré, au cours du siècle écoulé, la composition chimique de l'atmosphère. Cela s'est traduit d'une part par une augmentation de la teneur en polluants gazeux et particuliers avec des impacts

environnementaux, sanitaires mais aussi économiques et, d'autre part, par une modification de l'abondance des gaz à courte durée de vie, comme l'ozone, contribuant à l'effet de serre et des concentrations en particules qui modifient les propriétés radiatives de l'atmosphère et donc le climat terrestre.

■ Il est donc devenu nécessaire de comprendre et de pouvoir prédire les émissions de polluants, leurs transformations, dépôts et dispersion dans l'atmosphère. De même, identifier et comprendre les évolutions à long terme des teneurs de ces composés et leur impact est un défi majeur auquel il convient de contribuer. Les résultats obtenus devraient permettre de répondre aux préoccupations majeures de la société, l'objectif final étant d'appréhender dans

toutes leurs dimensions les conséquences des modifications de la composition de l'atmosphère sur notre environnement.

■ Les questions prioritaires auxquelles la communauté scientifique devra répondre sont articulées autour de cinq thèmes majeurs :

- ▶ Capacité oxydante de l'échelle locale à l'échelle globale ;
- ▶ Aérosols ;
- ▶ Chimie et microphysique des nuages ;
- ▶ Bilan des espèces traces dans la haute troposphère et la basse stratosphère ;
- ▶ Émissions et dépôts de constituants atmosphériques gazeux et particulaires ;

■ Il doit en résulter une meilleure connaissance des processus élémentaires et simultanément l'émergence d'une vision plus intégrée de la distribution des espèces chimiques réactives et de leurs effets sur l'environnement à différentes échelles.

### ■ Cycles biogéochimiques, écosystèmes et ressources

L'objectif général est d'accroître, grâce à des recherches pluridisciplinaires, notre connaissance du milieu afin de mieux comprendre, quantifier et modéliser les interactions (impact et rétroaction) entre climat, cycles biogéochimiques et écosystèmes marins. Ces recherches s'appuient globalement sur deux grandes catégories d'études. D'une part des études à caractère générique, à sensibilité plus biologique ou géochimique, se focalisant sur des processus ou des variables clés dont la paramétrisation apparaît essentielle pour la compréhension du système couplé climat - cycles biogéochimiques - écosystèmes. D'autre part des études ciblées sur des objets, en l'occurrence deux interfaces majeures de l'océan, les marges continentales et l'interface océan - atmosphère. Plus précisément quatre thèmes ont été identifiés :

■ **Structure des écosystèmes, diversité fonctionnelle et cycles biogéochimiques : observation, quantification et représentation dans les modèles.**

L'étude des interactions entre climat et cycles biogéochimiques nécessite de comprendre comment les communautés biologiques (du virus au poisson) s'adaptent aux modifications de l'environnement à différentes échelles de temps et d'espace et, en retour, contribuent à la modification des cycles.

■ **Cycles biogéochimiques des éléments en traces et de leurs isotopes.**

Les éléments en traces et leurs isotopes jouent un rôle fondamental comme nutriments et comme traceurs des processus actuels et passés dans l'océan. Notamment, la compréhension de leur cycle biogéochimique est essentielle pour les recherches relatives au cycle du carbone, au changement

climatique et au fonctionnement des écosystèmes océaniques.

■ **Processus biologiques et biogéochimiques au niveau des marges continentales**

Les marges, interfaces entre les domaines côtiers et hauturier, jouent un rôle essentiel dans la chimie, la biogéochimie et la production globale des océans. Par le passé, la complexité et la variété des échelles des processus à prendre en compte ont certainement contribué à ralentir l'émergence de recherches intégrées. L'apport de nouvelles techniques (modélisation aux fines échelles, observations *in situ* haute fréquence, télédétection et utilisation de nouveaux proxys) devrait permettre de relever le défi.

■ **Processus biologiques et biogéochimiques à l'interface océan-atmosphère**

L'évolution admise du climat a accru notre besoin de comprendre d'une part comment celle-ci influence les processus physiques et biogéochimiques dans le système couplé océan-atmosphère, et d'autre part, comment ce système rétroagit sur le climat.

## Evolution et variabilité du climat à l'échelle globale

L'objectif général est de parvenir à une compréhension intégrée du fonctionnement du système climatique planétaire (sa variabilité, ses changements), en tenant compte de ses différentes composantes (atmosphère, océan, cryosphère, hydrosphère, biosphère), de ses différents processus (physiques, chimiques, biologiques et biogéochimiques), et de leurs interactions. Les axes prioritaires sont :

▶ **La variabilité climatique récente : les 1000 dernières années**

Les 1000 dernières années représentent la période transitoire clé de l'histoire de notre système climatique qui a vu l'arrivée d'une action anthropique suffisamment importante pour perturber son évolution naturelle.

▶ **L'anthropocène, de 1850 à 2100**

Il s'agit en priorité de soutenir la contribution au GIEC de la communauté française, mais également de fournir des scénarii pour étudier l'impact du changement climatique sur les écosystèmes (marins et continentaux), sur les ressources en eau, les risques de sécheresse ou autres événements extrêmes ...

▶ **Quelles sont les relations causales, les interactions et les rétroactions entre climat et cycles biogéochimiques ?**

L'étude et la compréhension des fluctuations des taux de gaz à effet de serre, des concentrations en aérosols dans l'atmosphère, de la composition chimique de l'atmosphère et de sa capacité oxydante nécessitent de bien comprendre les processus régulant la distribution des puits et des sources et de disposer

## • Prospective - Priorités et orientations scientifiques

d'outils de simulation de diverses complexités. Cela implique l'intégration des cycles biogéochimiques dans les modèles climatiques afin d'étudier leurs interactions dans le cadre du changement climatique futur.

### ► Les variations climatiques abruptes : risques, conséquences, rétroactions

Les enregistrements de la circulation thermohaline montrent des basculements rapides (de l'ordre du siècle), qui sont encore insuffisamment documentés, compris et modélisés. Or, dans un contexte de changement futur où le cycle hydrologique va être profondément modifié, de tels événements peuvent se reproduire. Les études seront menées à la fois en étudiant les climats passés, par confrontation des enregistrements continentaux aux enregistrements océaniques et glaciaires, mais également en réalisation des études de sensibilité numériques explorant les risques de changements abrupts dans le futur, à des échelles de temps pouvant excéder le siècle.

### Interactions et dynamique de l'atmosphère et de l'océan

L'objectif général est de comprendre la dynamique des enveloppes fluides de la planète par des approches expérimentales ou numériques de l'ensemble des

phénomènes atmosphériques, océaniques et de leurs interactions, des échelles locale à globale, des périodes diurne à décennale. Quatre thèmes sont donc privilégiés :

► Les processus du cycle énergétique de l'atmosphère météorologique et de ses interactions avec les surfaces continentales et océaniques, de l'échelle locale à celle des perturbations planétaires, sous les tropiques, aux latitudes moyennes et polaires ;

► Les mécanismes conditionnant la circulation océanique et les transports associés de matière et d'énergie, à l'échelle globale, au niveau des différents bassins, à l'interface entre le talus et le plateau continental, dans les domaines côtier et littoral ;

► Les phénomènes associés à la variabilité du système couplé océan-atmosphère-surface continentale aux échelles temporelles intra-saisonnières à décennales, concernant notamment les caractéristiques d'évolution, de périodicité, d'instabilité (transitions rapides, processus à seuil, événements extrêmes,... ) et de prévisibilité ;

► Les interactions entre échelles spatiales et temporelles (de la turbulence à la variabilité pluriannuelle) et entre processus (par ex. dynamique et chimie atmosphérique, perturbations météorologiques et hydrologiques, biogéochimie et circulation océanique, couplages entre l'atmosphère et les surfaces continentales et océaniques, ...).

Systemes d'observation

Avions

Flotte

Ballons

Satellites

Parcs instrumentés

Moyens  
de calcul

III  
Organisation  
de la  
recherche

## Structure de la recherche

### Contexte international

#### ■ Les programmes internationaux

Une part importante de la réflexion scientifique internationale et sa mise en œuvre s'appuient sur des Unions Scientifiques Internationales (IUGG, Scor, Scar...) et des comités scientifiques nationaux du Cofusi (CNFRO, CNFCG, CNFRA, ...), émanant de l'académie des sciences, ou sur des programmes développés sous l'égide d'agences spécialisées des Nations unies (OMM, Unep, Unesco ...) et de l'ICSU. Dans cette deuxième catégorie, le WCRP et l'IGBP contribuent à structurer la recherche sur le climat et le changement global. Les comités nationaux assurent la liaison avec les unions scientifiques internationales. Sur un autre plan, il existe des groupes d'experts intergouvernementaux (ex : IPCC) dont le rôle est d'évaluer ou de définir un état de l'art dans un domaine scientifique particulier. Afin d'accroître la visibilité de ces activités, d'évaluer la dynamique d'ensemble et donc d'aider la communauté scientifique française à faire des choix stratégiques pour mieux se positionner au plan international, il semble opportun de disposer d'un lieu fournissant un inventaire de ces programmes (et les pages Web correspondantes), en précisant ceux sur lesquels la communauté est fortement engagée aujourd'hui.

■ Il y a actuellement une volonté d'élargissement des grands programmes internationaux au-delà des limites thématiques que couvre la division océan-atmosphère. La création de l'ESSP (Earth system science partnership) qui regroupe 4 programmes internationaux (WCRP IGBP, IHDP, et Diversitas) est un exemple récent d'effort de coordination pluridisciplinaire des recherches sur le changement global afin de pouvoir répondre aux nouveaux enjeux scientifiques et sociétaux : le climat, le cycle du carbone, le cycle de l'eau, l'environnement, les ressources alimentaires et la santé. Cette démarche souligne le souci d'intégrer les surfaces continentales, les cycles biogéochimiques, la biosphère, le monde du vivant et les enjeux de société à la réflexion sur le changement climatique et d'évoluer ainsi vers une réflexion sur les changements globaux où l'ensemble des paramètres évolue en interaction. Suivre cette évolution, à travers les questions clés qui focalisent les efforts, demande de franchir les frontières des programmes de l'Insu.

■ La France est encore relativement peu engagée dans l'administration des grands projets internationaux. Elle a cependant déjà géré avec succès plusieurs IPO

(International project office) et initié récemment un nouveau bureau pour soutenir la stratégie scientifique du WCRP (Copes) et de la recherche en océanographie (Imber). Les chercheurs français sont relativement présents dans les comités scientifiques des programmes internationaux, mais un soutien plus officiel de ces représentants permettrait qu'ils prennent conscience qu'à travers le mandat d'expertise qui leur est confié par leurs pairs, ils représentent également les efforts d'une communauté scientifique nationale, et qu'ainsi l'ensemble de la communauté puisse bénéficier du retour d'expertise. Il est apparu important de pouvoir disposer d'un relais à l'Insu dispensant l'information sur les actions en cours et les actions en préparation fournie par les représentants des relations internationales d'organismes nationaux et internationaux, mais aussi celle des représentants français présents impliqués dans la gestion de la recherche internationale ou encore ceux qui composent les comités nationaux de l'académie des Sciences. On observe l'absence de « lieu » de rencontre entre les chercheurs nommés en tant qu'individus dans des commissions internationales et les instituts de tutelles pour échanger les informations et rendre plus cohérente la stratégie nationale. Un effort d'information et de coordination doit être entrepris, impliquant un renforcement du rôle de la cellule internationale et européenne de l'Insu, un dialogue entre les acteurs de la programmation scientifique à l'Insu et les chercheurs français présents dans les comités scientifiques de programmes internationaux.

■ Des programmes scientifiques sont mis en œuvre à l'échelon européen grâce à l'Union européenne mais aussi grâce à l'Esa (European space agency) ou d'autres organisations européennes, et enfin à l'échelon international grâce aux organisations onusiennes ou par des accords multilatéraux (Nasa, Cnes, NOAA...). La cohérence entre programmes nationaux - européens - internationaux est loin d'être parfaite, mais réussir ce tiercé est essentiel pour développer l'influence de la communauté scientifique française dans les actions menées au plan international dans les domaines scientifiques ou d'application, ou même en soutien à certaines orientations politiques. Si les chercheurs sont assez bien intégrés dans les programmes existants, l'Insu et ses partenaires devraient jouer un rôle structurant pour évaluer l'implication des chercheurs dans les programmes existants et nouveaux, et améliorer le positionnement de leurs actions. Ceci implique d'avoir une réflexion sur les liens entre programmes nationaux et internationaux.

## ■ Politique européenne des moyens

### ► Programmation

Le PCRD et l'European science foundation (ESF) sont les deux principaux cadres de coopération européenne destinés à catalyser et promouvoir la recherche scientifique à haut niveau entre chercheurs européens. Les Groupes thématiques nationaux (GTN) sont un des relais importants entre la communauté scientifique (universités, organismes scientifiques, industriels...) et les programmes thématiques du 7ème PCRD. C'est à travers ces groupes que nous pouvons intervenir sur la rédaction des Programmes Spécifiques et des Programmes de Travail en cours d'élaboration (appel d'offres) ou sur le suivi des programmes en cours (évaluation des résultats). Au-delà des GTN, il existe d'autres canaux pour faire remonter les propositions françaises (ex : Marine Board et Polar Board de l'ESF, l'ESFRI pour étayer le choix des grosses infrastructures, ...).

■ Composante du futur PCRD, l'ERC (European research council) vise à ouvrir la compétition et à renforcer l'excellence scientifique tout en exploitant pleinement l'échelle européenne. L'objectif est de stimuler la concurrence entre équipes de chercheurs, dans tous les domaines de la recherche, pour des équipes non nécessairement trans-nationales et sélectionnées sur le seul critère de l'excellence. Cette structure viendrait en complément des programmes cadres du PCRD. Pour l'instant en phase de mise en place, il faudra être attentif à l'intégration rapide de ce nouvel outil de la recherche européenne dans le panorama national.

■ L'Europe de la recherche est sans doute l'initiative la plus mûre au point de vue de l'évolution européenne et elle risque d'entraîner une véritable mobilité, avec l'identification de centres ou de réseaux d'excellence.

■ Enfin, l'ESF émanation d'organismes européens de la recherche, dont le CNRS, s'appuie sur plusieurs instruments (ateliers exploratoires, réseaux, conférences, programmes à la carte, les prix des Jeunes chercheurs européens (EURYI) destinés à faciliter la coopération selon une démarche descendante et ascendante. Cependant, la mise en place des Eurocores (European collaborative research programmes) implique le financement et la mise à disposition de moyens (équipements, navires...) qui demandent un effort de coordination supplémentaire avec les programmes et les organismes.

### ► Global monitoring for environment and security (GMES)

Un programme ambitieux (GMES) a été mis en place conjointement par la Commission européenne et l'Agence spatiale européenne dans le but de doter l'Europe de moyens opérationnels visant :

► à surveiller, prévoir ou anticiper les phénomènes

naturels ou anthropiques ayant un impact déterminant sur les conditions de vie ou les risques ;

► à aider à la décision de manière préventive ou en situation de crise ;

► à disposer d'outils objectifs pour remédier aux atteintes portées à l'environnement et diminuer l'impact des risques.

■ De plus, à la suite du G8 d'Évian du printemps 2003, un sommet de l'observation de la Terre a été organisé en juillet 2003 à l'initiative des États-Unis. Ce sommet a abouti à la création du GEO (Group on Earth Observations) dont l'objectif ambitieux est d'aboutir à la mise en place d'un programme mondial d'observation de la Terre, sur une période de 10 ans, afin de répondre aux attentes de la société, notamment en matière de changement climatique, de développement durable et de gestion des risques. Ce programme a été approuvé lors du troisième sommet du groupe en Février 2005 à Bruxelles. La France s'est engagée résolument dans ce processus et a fait valoir, dans une démarche européenne consensuelle, que le programme européen de surveillance globale pour l'environnement et la sécurité (GMES) constitue une des contributions naturelles de l'Europe à ce processus. Les problématiques concernées sont principalement la gestion des milieux océaniques et atmosphériques, des surfaces continentales, les ressources en eau et les risques naturels et industriels.

■ Compte tenu des priorités politiques et des moyens mis en œuvre, ces programmes vont fortement conditionner la nature des recherches qui seront menées ces prochaines années pour répondre à la demande sociétale en matière d'environnement. Cette dimension internationale, nouvelle dans sa structuration, implique que l'ensemble des acteurs concernés (communauté scientifique, agences, ministères...) définisse conjointement ses priorités et les moyens d'action qu'elle envisage de mettre en œuvre.

■ La mise en place de GMES nécessite une réflexion de notre communauté sur la manière de se doter de moyens d'observation de la Terre exhaustifs, coordonnés et pérennes. Dans cette optique, les échelons nationaux sont déterminants en matière de déploiement ou de maintenance de réseaux de mesures *in situ*, le niveau international jouant cependant un rôle important pour l'harmonisation, la standardisation et la certification des méthodes d'observation et de mesure, base indispensable à leur mise en commun. Actuellement le problème de la pérennisation se pose au niveau institutionnel. L'émergence d'Observatoires Européens de Recherche en Environnement (OERE) est indispensable pour atteindre les masses critiques nécessaires au suivi, à la compréhension et à la prévision de l'évolution de notre environnement. Le maintien du lien entre la recherche et les services d'observations sur un thème

## • Organisation de la recherche

donné est impératif, car, d'une part, il est le garant d'une amélioration de ces services opérationnels par le transfert des résultats de recherche, et, d'autre part, il permet en retour d'être la source de travaux de recherche sur la base des données opérationnelles collectées et en fonction des besoins exprimés par les services opérationnels.

### ► Infrastructures

La politique européenne d'équipement (flotte, avions, grands outils de calcul, base de données, services d'observations...) se discute dans le cadre de l'Esfri (European strategy forum on research infrastructures, mis en place en 2002) Elle a pour mission de proposer les domaines dans lesquels l'Union européenne devrait se doter d'infrastructures nouvelles (ou plus performantes). L'Esfri a sélectionné les infrastructures de recherches d'intérêt pan-européen qui pourraient être soutenues pendant la période du 7<sup>ème</sup> PCRD (2007-2013).

■ Des efforts de mutualisation des infrastructures ont déjà été entrepris au niveau européen pour les avions et les navires, permettant de s'équiper des outils les plus performants, tout en élargissant leur potentiel d'utilisation. L'infrastructure « distribuée » (flotte d'avions ou de navires) nécessite cependant un cadre de fonctionnement différent de celui des grands instruments, pour lesquels il est nécessaire de concentrer toutes les expertises en un lieu unique. La mise en place de l'infrastructure Eufar (European fleet for airborne research), par exemple, répond à ce besoin de mutualisation du parc d'avions de recherche européens. Le vecteur (avion ou navire) et son équipement de base d'une part, les instruments embarqués d'autre part, peuvent être développés et maintenus par un réseau de laboratoires experts, distribués dans plusieurs pays de l'Union. Des liens existent avec le comité avion français pour relayer l'information vers la communauté nationale intéressée. Pour la flotte, au plan européen, l'Ifremer a eu un rôle pionnier avec les co-investissements sur les navires L'Europe (1993) avec l'Icram (Italie), Thalassa (1996) avec l'IEO (Espagne) et le module de mesure en route du Victor 6000 (2004) avec l'AWI (Allemagne). Un effort sur l'inter-opérabilité des moyens a également été conduit pour le Victor 6000 déployable depuis 1999 à partir du navire allemand Polarstern et bientôt du nouveau navire espagnol du CSIC. Ce dispositif est complété par l'existence d'un mécanisme d'échange de temps bateau, l'OFEG (Ocean facilities exchange group). La communauté scientifique française a accès (via les accords signés par l'Ifremer) à des navires et équipements allemands, britanniques et néerlandais ; à terme l'Espagne doit rejoindre le groupe.

■ Ces accords contribuent à permettre un usage plus efficace des ressources de chacun des partenaires en donnant accès à une panoplie plus large de moyens navals et/ou d'équipements embarqués et à tous les

océans en limitant les transits. Malgré ces efforts pour rationaliser l'offre de jours à la mer, la gouvernance du système au niveau européen reste faible, surtout du côté de la demande (appel d'offres communs). Actuellement le financement des navires reste essentiellement à la charge des pays et l'Union européenne ne prévoit toujours pas de financement pour les campagnes océanographiques. Le Marine board de l'ESF a décrit dans son document « Navigating the future » ce que pourrait être une stratégie de recherche marine au niveau européen, y compris les infrastructures nécessaires.

■ Les supercalculateurs font partie des Très grands équipements (TGE) pour lesquels nous avons besoin d'une programmation stratégique. Conformément aux recommandations d'une commission d'experts, il est envisagé de créer une société civile du calcul intensif dans une structure juridique souple dont seront actionnaires les établissements de recherche (organismes et universités) et les ministères concernés. Au plan européen, la France a pris l'initiative, avec l'Allemagne et le Royaume-Uni, de proposer de construire un grand calculateur européen, avec le soutien de la Commission européenne. Une telle décision démontre, s'il en était besoin, que c'est l'échelle européenne qui est désormais pertinente pour la réflexion et l'action en matière de grandes infrastructures de recherche.

■ Le concept de grilles informatiques est apparu avec le besoin de globalisation des ressources informatiques et des données. Il s'agit de ressources distribuées, reliées par un réseau rapide (Geant) et auxquelles est associé un gestionnaire de tâches qui assure à la fois la sécurité et la répartition des travaux entre les sites. En 2000, 2 projets européens de grille ont démarré. Le premier, DataGrid, est orienté vers le partage et traitement des données. Le second projet, EuroGrid, concernait une grille de supercalculateurs. Cinq ans après, 2 projets européens de large envergure sont en cours, Egee faisant suite à DataGrid et Deisa à EuroGrid, et un projet national d'envergure, Grid'5000.

■ Compte tenu de la dimension politique des outils de gestion de l'environnement, ils devront à terme être clairement perçus comme des outils communautaires européens. Ceci implique de mettre en œuvre les moyens par lesquels il sera possible de développer en commun et en transnational, ces outils du futur. À cet effet, une implication forte des organismes nationaux concernés (au premier chef, l'Insu) dans les réseaux d'organismes mis en place par l'Union européenne (Eranet) s'avère essentielle.

■ Le paysage se complexifie et la coordination entre les différents échelons (régional, national, européen et international) doit se renforcer. L'idée d'un exécutif restreint pour une meilleure coordination et circulation de l'information, tant pour ce qui concerne la programmation scientifique, que pour ce qui concerne les moyens et infrastructures, pourrait palier

le manque d'anticipation de la communauté. Il semble tout aussi nécessaire d'adapter nos procédures comptables et administratives au contexte européen afin de remédier aux difficultés rencontrées en France pour coordonner les projets européens, et d'éviter que cela devienne un handicap sérieux dans le futur.

## Organisation nationale

La communauté scientifique nationale dispose déjà d'outils assez différents, grâce à une coopération inter-organisme forte :

► Des programmes de recherche visant à établir les bases scientifiques nécessaires à la compréhension des phénomènes et à l'élaboration d'outils dans le souci de les rendre, à terme, opérationnels. Par exemple, les programmes inter-organismes gérés par l'Insu, les actions de recherche nationales soutenues dans le cadre des « Framework programs » de l'Union européenne ou la participation aux grandes campagnes internationales ont, pour partie, vocation à assurer cette tâche.

► Des programmes plus appliqués tels que ceux qui sont mis en place par le Ministère de l'environnement et du développement durable (GICC, Primequal, Liteau...) tendant à fournir de l'expertise ou à mener des études ciblées, par exemple des analyses de scénarios.

► Des systèmes d'observations *in situ* ou spatiaux renseignant sur l'évolution des variables clés, assurant la surveillance du respect des normes ou permettant la détection de nouvelles perturbations. Les services d'observations labellisés par l'Insu ainsi que les réseaux opérationnels mis en place par les différents ministères ou organismes contribuent de façon plus ou moins directe à ces observations.

► Des systèmes intégrés dans lesquels les outils de modélisation et d'observation sont combinés pour aboutir à de véritables systèmes opérationnels de gestion de l'environnement. Ils nécessitent la mise en place de « consortiums » permettant d'associer dans ces projets l'ensemble des acteurs concernés (laboratoires, instituts appliqués, réseaux de surveillance, agences, ministères...). Les meilleurs exemples de ce type de démarche sont le système de prévision océanique, Mercator et le système de prévision des pics de pollution atmosphérique, Prev'air.

■ Pour répondre à ces nouveaux enjeux, il est nécessaire de faire évoluer sur certains points la façon dont nos activités de recherche sont organisées :

► Développer des systèmes intégrés de gestion de l'environnement nécessite, outre de structurer les coopérations entre laboratoires pour agréger autour d'un projet commun des compétences éparpillées entre différentes disciplines, d'intégrer dès leur élaboration les utilisateurs finaux. Pour ce faire, il est indispensable de penser des consortiums c'est-à-dire

de transposer dans d'autres domaines, le schéma qui a bien fonctionné pour des projets tels que Mercator ou Prev'air. La nature et les objectifs à visée opérationnelle de ces projets imposent nécessairement d'aller jusqu'à la réalisation de « prototypes » de service et d'en démontrer le caractère opérationnel. Ce sont là de nouvelles missions qui demandent de définir précisément les méthodes de travail adaptées (dont on peut penser qu'elles devraient se rapprocher du mode de gestion des projets spatiaux).

► Les régions sont des espaces géographiques bien adaptés à la mise en œuvre de projets interdisciplinaires. De même, du fait de leur proximité avec les citoyens, les pouvoirs politiques régionaux se trouvent particulièrement à même de relayer de façon assez directe les demandes des populations. Il est donc pertinent que les régions proposent une offre de recherche à cette échelle. Néanmoins, la façon dont la communauté scientifique répond à ces demandes peut engendrer des problèmes de cohérence scientifique, voire déstructurer des actions menées par ailleurs au niveau national. Pour assurer une réponse scientifique de qualité et complémentaire des actions nationales, il est nécessaire d'organiser, avec les différents partenaires concernés, la réponse aux appels d'offre régionaux. Par ailleurs, il est également essentiel, dans un souci d'optimisation des travaux, que les résultats des recherches menées dans le cadre régional puissent être accessibles à l'ensemble des acteurs potentiellement concernés. Ces retours d'expérience permettraient d'éviter des doublons et autoriseraient une utilisation plus rapide des résultats par d'autres régions.

■ Par ailleurs, l'évaluation des différents programmes nationaux en océan-atmosphère (Patom, PNCA, PNEDC, Proof, ...) a montré que leurs contours actuels ne répondent plus aux enjeux scientifiques. En effet, il faut d'une part renforcer la pluridisciplinarité et faciliter les actions transverses, et d'autre part rendre le fonctionnement des Programmes plus efficace et plus attractif. Ces constatations ont conduit à proposer la création d'un Programme national unique « Les Enveloppes fluides et l'environnement » - LEFE au fonctionnement simplifié. LEFE renforcera le rôle structurant des Programmes océan-Atmosphère et facilitera l'émergence de projets transverses.

■ L'objectif du Programme national LEFE est de susciter et d'accompagner des recherches sur le fonctionnement de l'atmosphère et de l'océan, leur couplage, leurs interactions avec les autres composantes du système climatique (cryosphère, biosphère, hydrosphère) d'un point de vue dynamique, physique, chimique, biologique et biogéochimique. Il faut améliorer notre compréhension du fonctionnement et des perturbations multi échelles du système Terre et mieux prévoir les réponses au forçage anthropique. Le programme national LEFE est

## • Organisation de la recherche

constitué de quatre programmes thématiques (Chimie Atmosphérique ; Cycles biogéochimiques, écosystèmes et ressources ; Evolution et variabilité du climat à échelle globale ; Interactions et dynamique de l'océan et de l'atmosphère), d'un programme méthodologique « Assimilation de données ». En complément, le programme Amma est géré par une action programmée inter-organismes (API) Amma.

■ La structuration proposée a pour but d'offrir, via LEFE, une visibilité accrue des recherches menées dans le domaine de l'océan et de l'atmosphère à la fois à la communauté nationale et aux organismes partenaires ; de permettre une meilleure synergie entre les programmes de LEFE et une coordination améliorée avec les autres programmes nationaux dans lesquels est impliquée la communauté. En particulier, le lien avec le Programme national de télédétection spatiale se fera via un Comité inter-organisme commun. Une coordination avec le programme EC2CO est souhaitable en particulier dans le domaine côtier. En offrant un cadre de réflexion scientifique unique, et en intégrant les différentes spécificités de la communauté océan-atmosphère, le Conseil scientifique de LEFE pourra susciter de nouvelles actions coordonnées et favoriser l'émergence de projets transdisciplinaires ayant vocation à être proposés en réponse aux appels d'offre de l'Agence nationale de la recherche ou de l'Europe.

■ Le programme national LEFE doit devenir le portail incontournable pour l'évaluation scientifique des projets de recherche de la communauté océan-atmosphère, et des moyens à mettre en œuvre pour les réaliser. Les propositions couvrant les champs de plusieurs programmes feront l'objet d'un dossier unique. Dans un but de simplification et pour assurer une meilleure visibilité à moyen terme, une gestion réellement pluriannuelle est introduite, les propositions de recherche pouvant être sélectionnées pour une période allant jusqu'à 3 ans. LEFE formulera des recommandations pour d'autres commissions scientifiques (en particulier les commissions en charge de l'examen des demandes de campagnes à la mer, le comité « Avion », le comité « Ballon », etc.). Les équipements mi-lourds, et le soutien éventuel de la Division technique de l'Insu, seront demandés dans le cadre des propositions scientifiques soumises à LEFE. Un soutien pourra être accordé pour des demandes de bourses doctorales ou postdoctorales, ou par l'affichage de sujets auprès des organismes partenaires de LEFE.

■ La nouvelle structuration des programmes nationaux de la Division océan-atmosphère (Programme LEFE) constitue un élément important vers plus de coordination et de réactivité des communautés vis-à-vis du positionnement international, mais cette initiative doit cependant se poursuivre vers les divisions et départements connexes.

### Les composantes du programme national « Les enveloppes fluides et l'environnement » (LEFE)

#### Programme Chimie atmosphérique - Chat

Le Programme de chimie atmosphérique (Chat) vise à répondre aux préoccupations majeures de la société, l'objectif final étant d'appréhender dans toutes leurs dimensions les conséquences des modifications de la composition de l'atmosphère sur notre environnement. Il doit en résulter une meilleure connaissance des processus élémentaires et simultanément l'émergence d'une vision plus intégrée de la distribution des espèces chimiques réactives et de leurs effets sur l'environnement à différentes échelles.

■ Les questions prioritaires, auxquelles la communauté scientifique peut répondre grâce à la complémentarité des moyens instrumentaux, des méthodes d'observation et des outils d'interprétation et de prédiction, ont ainsi été identifiées (cf. partie 2). Elles sont accompagnées de la mise en œuvre d'études amont et d'outils transversaux indispensables :

- ▶ Études des processus physico-chimiques atmosphériques en laboratoire ;
- ▶ Études spectroscopiques d'espèces atmosphériques ;
- ▶ Instrumentation ;
- ▶ Outils et méthodes pour la modélisation et l'assimilation.

■ Les actions du programme Chat s'inscrivent dans de nombreux programmes internationaux tels que IGBP, Igac, SOLAS, et dans des projets européens (Accent, Scout, etc.) et soutiennent les recherches amonts pour la définition des systèmes de prévision à caractère opérationnel dans le cadre de GMES.

#### Programme Cycles biogéochimiques, écosystèmes et ressources - Cyber

L'objectif général du programme Cyber est de contribuer, grâce à des recherches pluridisciplinaires, à l'acquisition des connaissances permettant de comprendre, quantifier et modéliser les interactions (impact et rétroaction) entre climat, cycles biogéochimiques et écosystèmes marins. Il s'articule autour de quatre thèmes :

- ▶ **Structure des écosystèmes, diversité fonctionnelle et cycles biogéochimiques : observation, quantification et représentation dans les modèles** (au plan international, ce thème représente la contribution française à Imber et Globec et au Réseau d'excellence Eurocéan).
- ▶ **Cycles biogéochimiques des éléments traces et de leurs isotopes** (ce thème représente la contribution française au programme international Géotracés).

► **Processus biologiques et biogéochimiques au niveau des marges continentales** (ce thème relève de la contribution française aux programmes internationaux LOICZ II, Imber et Géotraces).

► **Processus biologiques et biogéochimiques à l'interface océan-atmosphère** (ce thème relève de la contribution française au programme Solas).

## Programme Evolution et variabilité du climat à l'échelle globale - Eve

L'objectif du programme Eve est de permettre une compréhension intégrée du fonctionnement du système climatique planétaire, sa variabilité, ses changements. Il veut favoriser l'ensemble des travaux d'observation, de modélisation, d'analyse et de synthèse permettant d'atteindre une vision d'ensemble de notre système climatique, de sa variabilité, de son évolution.

■ Eve s'appuie sur des observations et des modélisations à différentes échelles de temps - allant de l'échelle saisonnière à l'échelle millénaire - et sur différentes échelles spatiales au niveau de leur interaction avec l'échelle globale et sur des hiérarchies de modèles.

■ Au plan international, ses activités se placent dans le cadre de IPCC, IGBP/AIMES, WCRP (Clivar, WGCM), ESSP, Pages, des programmes d'inter-comparaison des modèles climatiques (Amip, PMIP, CMIP, C4MIP), Images. Le succès de EVE dépend de la synergie qu'il est capable de créer entre les physiciens du climat, géologues, géochimistes, chimistes et biologistes s'intéressant aux changements climatiques.

## Programme Interactions et dynamique de l'atmosphère et de l'océan - Idao

Le programme Idao vise à la compréhension de la dynamique des enveloppes fluides de la planète par des approches expérimentales ou numériques de l'ensemble des phénomènes atmosphériques, océaniques et de leurs interactions. Plus spécifiquement, les thèmes prioritaires sont :

### ■ Processus atmosphériques

► **Météorologie tropicale** (en dehors de AMMA) : équilibres de grande échelle, phénomènes synoptiques, perturbations convectives ;

► **Météorologie des moyennes et hautes latitudes** : convection continentale d'été, perturbations méditerranéennes, prévisibilité des systèmes atmosphériques ;

► **Physique des nuages** : formation et évolution des hydrométéores, électricité atmosphérique ; Etude des précipitations : mesure de l'humidité et de l'eau condensée, couplage avec des modèles hydrologiques, géostatistique de la pluie ; Interactions nuage-rayonnement ;

► **Phénomènes de couche limite**, notamment en terrain complexe, et caractérisation des flux aux interfaces ; **Météorologie urbaine** : bilans d'énergie, circulations induites, spécificité de la mesure.

### ■ Océanographie

► **Grande échelle** : dynamique des bassins, forçages externes et internes, rôle de la méso-échelle, interactions aux limites (atmosphère, marges, ... ) ;

► **Moyenne échelle** : mécanismes de la subduction, structures énergétiques, enfouissement du carbone, processus physiques et biologiques ;

► **Côtier** : formation d'eaux denses, apport des fleuves, forçage par la topographie, ondes internes ; zones prioritaires de Méditerranée nord occidentale et du golfe de Gascogne ;

► **Littoral** : circulation et ondes, impact de la marée, déferlement, hydrosédimentation.

### ■ Variabilité saisonnière et pluriannuelle

► **Atlantique Nord et Méditerranée** : mécanismes et variabilité de NAO et des autres modes (AO, OMA), impacts sur l'Europe, paramètres clés et prévisibilité, téléconnexions ;

► **Régions tropicales** : processus océaniques tropicaux et équatoriaux, impacts atmosphériques, interactions avec les surfaces continentales, téléconnexions, variabilité et prévisibilité des moussons ;

► **Régions Australes** : dynamique du système couplé océan - glace de mer - calottes - atmosphère, bilans d'énergie et de matière, contrôle physique de la biogéochimie, modes de la variabilité australe (OAA), réponse aux forçages externes.

## Programme Assimilation de données - Assim

L'assimilation de données recouvre toutes les méthodes, théoriques, mathématiques et numériques permettant d'utiliser toutes les informations disponibles (observations, lois théoriques) sur un système pour reconstruire aussi précisément que possible l'état de ce système dans toute sa dimension spatio-temporelle. Par nature, l'assimilation est un outil d'intégration, de diagnostic et de valorisation optimale des modèles et des données. Mais elle est aussi un outil puissant pour l'amélioration des modèles et l'optimisation des systèmes d'observation.

■ La météorologie dynamique puis l'océanographie dynamique ont été les premières à se saisir des outils de l'assimilation, notamment dans la perspective de la prévision météorologique. Plus récemment d'autres domaines ont commencé à mettre en œuvre ces outils de manière plus ou moins rapide compte tenu de leurs complexités propres : chimie atmosphérique, biogéochimie marine, hydrologie, glaciologie, paléoclimatologie, etc....

■ En raison de leur sophistication mathématique, les activités de l'assimilation trouvent un appui permanent auprès des mathématiciens et les innovations futures s'appuieront sur une articulation forte entre géophysiciens et mathématiciens.

■ Dans ce contexte, le programme Assim vise à :

► Stimuler les recherches innovantes et fondamentales en assimilation, de leur donner la reconnaissance et le soutien nécessaires ;

► Favoriser les échanges scientifiques sur des thèmes en pointe des recherches théoriques dans le domaine de l'assimilation de données, de partager cette réflexion entre des communautés disciplinaires différentes et d'en enrichir ces recherches grâce à cette pluridisciplinarité ;

► Participer à des actions de formations et d'une manière générale de diffuser largement les potentialités scientifiques et les techniques de l'assimilation ;

► Jouer un rôle d'animation au niveau de l'Europe dans ce domaine.

■ Le programme Assim a une vocation première de recherche fondamentale même si l'outil vient en appui de nombreux projets à caractère opérationnel. Dans le contexte européen actuel, plusieurs projets sont consacrés en totalité et en partie à l'assimilation : GEMS, Mersea, Ensembles, Asset, etc. Le programme œuvrera à l'émergence d'un réseau européen de recherche sur l'assimilation de données.

### Programme national de télédétection spatiale - PNTS

**G**éré et coordonné par l'Insu, le PNTS est résolument multi organismes et ses actions peuvent concerner des thématiques telles que "Homme et Société". Les activités du PNTS concernent les techniques d'observation de la Terre et les développements pour l'utilisation thématique des données et produits qui en sont dérivés. Les techniques de mesure permettent de caractériser la surface, l'intérieur, et les enveloppes fluides de la Terre. Les disciplines scientifiques concernées relèvent de l'étude des surfaces continentales, de la physique et la biogéochimie océaniques, de l'atmosphère, de la terre solide, de la cryosphère, et des recherches dans le domaine des sciences humaines. Cette liste n'est pas nécessairement limitative.

■ Le PNTS se positionne sur des recherches ayant trait aux développements méthodologiques ou utilisant des données spatiales innovantes, ce qui couvre :

▶ Les études de physique de la mesure, et notamment le développement de modèles d'interaction entre les ondes électromagnétiques et l'atmosphère ou les surfaces continentales ou océaniques, incluant l'acquisition des mesures *in situ* de données géophysiques et radiométriques nécessaires au développement ou à la validation de ces modélisations ou algorithmes.

▶ Les travaux permettant la préparation de missions futures dans les domaines spectraux solaire, infrarouge et micro-ondes (capteurs actifs ou passifs).

▶ Les études visant à utiliser les nouvelles potentialités, encore sous-exploitées, offertes par les futurs instruments spatiaux : informations multi spectrales, multi angulaires, polarimétriques et interférométriques.

▶ Les développements méthodologiques qui utilisent de nouveaux concepts ou de nouvelles techniques de mesure

comme la très haute résolution spatiale, la haute répétitivité temporelle de mesure, les radars basses fréquences, la fluorescence, l'interférométrie, les techniques de corrélation d'images aussi bien en radar qu'en optique, les mesures lidar, les données hyper spectrales, la polarimétrie, le bistatique, etc.

▶ Les développements méthodologiques associés à la validation des modélisations du signal (directes et/ou inverses) en précisant leurs domaines de validité (extension spatiale et temporelle, précision).

▶ Le développement de nouvelles méthodes mathématiques d'interprétation, de classification et d'inversion reposant sur des approches physiques ou algorithmiques originales.

▶ Le développement et la validation de techniques de traitement du signal susceptibles de déboucher sur de nouvelles applications (caractérisation des structures urbaines, de la pollution, des forêts, de l'occupation du sol, de l'environnement côtier, météorologie marine, entre autres).

▶ L'analyse des relations entre échelles spatiales, l'intégration de variables (grandeurs physiques) de l'échelle locale vers des échelles plus larges, et inversement (agrégation, désagrégation), ainsi que les méthodes d'analyse spatiale de ces variables.

▶ Les méthodes associées à l'utilisation des longues séries temporelles de données satellitaires acquises par différents capteurs, nécessitant en particulier des développements pour contrôler les dérives potentielles des capteurs et s'assurer de l'inter étalonnage, de l'homogénéité des méthodes de correction et d'inversion, et/ou de la comparabilité des précisions sur les paramètres dérivés.

■ Enfin, le PNTS désire favoriser les échanges et transferts d'expérience entre communautés impliquées dans des recherches sur les différents compartiments du système terrestre, et les collaborations interdisciplinaires autour de capteurs ou de méthodologies communs.

## Systemes et moyens d'observations

**C**omme les orientations scientifiques qui viennent d'être exposées l'ont souligné, l'observation joue un rôle très important dans nos disciplines. Il y a un besoin d'acquérir des jeux de données sur une échelle de temps adaptée à l'évolution des systèmes étudiés, d'effectuer des campagnes de terrain pendant lesquelles sont déployés des instruments innovants sur des plate-formes du type avion, bateau ou ballon, d'observer les différents milieux à l'échelle globale notamment en s'appuyant sur l'observation par satellite. L'expérimentation en conditions contrôlées reste également un point fort de nos disciplines pour mieux comprendre les processus existants dans l'atmosphère ou l'océan. Le volume d'information disponible devient tel qu'il est aussi nécessaire de réfléchir à la mise à disposition des données auprès de la communauté. Enfin, les moyens de calcul intensif constituent un outil indispensable aux travaux de

modélisation du Système Terre pour comprendre les couplages atmosphère-océan-biosphère et leur variabilité temporelle.

■ L'ensemble de ces besoins représente un coût très important partagé par plusieurs organismes. Cette partie dresse un état des lieux de l'existant et donne quelques éléments de réflexion pour l'évolution dans les années qui viennent.

### Les plates-formes d'observations

#### ■ Les avions de recherche

#### ■ État des lieux

La mesure aéroportée est devenue aussi essentielle à la recherche atmosphérique que l'utilisation de

bateaux peut l'être pour la recherche océanographique. Il est en effet illusoire de penser que l'ensemble des besoins en données de terrain peut être couvert par des mesures à distance depuis le sol ou depuis l'espace. La communauté française s'est fortement investie ces quatre dernières années pour participer aux évolutions importantes dans ce domaine. Les principales évolutions récentes sont les suivantes :

- ▶ Le renouvellement de la flotte des avions de recherche français est intervenu en 2006, et la communauté dispose actuellement de trois vecteurs possibles : un turbopropulseur ATR-42 avec une charge utile de 2 tonnes, un Falcon-20 pour les mesures en altitude et un bon rayon d'action, et un Piper-Aztec pour les études de pollution locale. Cette évolution s'est accompagnée par la mise en place d'une unité mixte de service (unité Safire), qui regroupe les moyens humains, financiers et les trois avions de recherche du CNRS/Insu, de Météo France et du Cnes. Safire a pour mission de mettre en oeuvre ces avions et l'instrumentation associée au profit de la recherche dans le cadre de campagnes expérimentales.
- ▶ Le développement, dans le cadre de ce renouvellement de la flotte aérienne, de nouvelles techniques de mesures aéroportées, notamment pour la mesure des aérosols et des gaz réactifs, l'observation par télédétection aéroportée de l'atmosphère et des surfaces.
- ▶ La mise en place d'une gestion coordonnée des infrastructures européennes (projet Eufar). L'accès transnational via Eufar permet de faire bénéficier de 430 heures de vol sur 24 avions l'ensemble de la communauté européenne de recherche.

#### ■ Perspectives et besoins

En ce qui concerne la prospective, les priorités sont les suivantes :

#### ▶ Mener une réflexion et faire un choix concernant le remplacement potentiel de l'avion Piper-Aztec dont le vieillissement est avéré.

Dans ce cadre, une analyse de l'intérêt de nouveaux véhicules, comme les avions ultralégers (ULM) ou des avions sans pilote télécommandés (drones), devra être menée. Leurs avantages par rapport aux avions de la classe du Piper-Aztec sont un coût réduit et une grande souplesse des profils de vol (profils verticaux adaptés à des mesures de flux, montées lentes pour des capteurs peu rapides, ...). La contrepartie sera de disposer de capteurs compacts et quasi-automatiques encore limités à des applications particulières (mesure d'ozone, caractéristiques physiques de l'aérosol : nombre, spectre en taille).

#### ▶ Développer au sein de Safire une infrastructure de qualité pour l'étalonnage des instruments de base et quelques instruments plus spécifiques (microphysique, chimie), avec une évaluation régulière par les experts de la mesure.

La montée en puissance des mesures de chimie dans le parc des instruments de base implique de veiller à disposer au sein de Safire de personnes possédant un savoir faire sur la mesure des gaz et des aérosols en complément au savoir faire sur les mesures dynamiques et thermodynamiques.

#### ▶ Rendre systématique le conseil aux laboratoires par Safire pour "avioniser" de nouveaux instruments, afin que leur certification sur les avions soit rapide et simplifiée.

#### ▶ Concernant le traitement des données, renforcer la coordination et concertation entre chercheurs et ingénieurs des laboratoires, et experts du comité scientifique des avions ou du projet Eufar.

#### ■ Le contexte européen

Le programme européen Eufar a mis en place une coordination de l'accès trans-national, un groupe de travail sur le futur de la flotte et des groupes d'experts en mesures aéroportées. Au niveau national, nous devons donc faciliter les procédures d'accès trans-national, d'abord par la mise en place de quotas d'heures sur nos avions, et ensuite par la mise en place d'une politique volontariste d'aide à la certification des instruments aéroportés sur plusieurs plates-formes. Un projet de recherche coopératif visant à la conception et la fabrication d'un conteneur équipé pour la mesure de l'aérosol, qui sera embarquable sur plus de la moitié des avions de la flotte européenne pour étalonner leurs propres systèmes de mesure, est l'exemple même de ce qui doit être fait en matière de coopération sur l'instrumentation.

■ À l'horizon 2009, la principale lacune en Europe restera l'accès à un avion à long rayon d'action avec une charge utile importante pour l'exploration de la basse troposphère. Un seul aéronef offre ces capacités aujourd'hui, il s'agit du C130. En conséquence la communauté française doit participer à la réflexion engagée au niveau européen pour la construction et l'opération d'un C130 dans le cadre Esfri.

#### ■ Les ballons

##### ■ État des lieux

L'emploi de ballons pour la recherche atmosphérique et astronomique a débuté en France sous l'impulsion des scientifiques au début des années 1960, avec le soutien important du Cnes. Ces dernières années, les observations à partir de ballons ont continué de prouver leur utilité pour de nombreuses recherches, comme celles qui concernent la destruction de l'ozone stratosphérique ou la validation des mesures satellitaires de chimie. Une des caractéristiques de l'activité depuis les années 1990 est l'ouverture vers une activité à l'échelle européenne avec un tiers des vols effectués dans le cadre de programmes européens.

## • Organisation de la Recherche

■ Pour soutenir cette activité, le Cnes consacre un effort important (environ 60 personnels Cnes) au maintien d'une équipe opérationnelle, et aux développements de véhicules et de nacelles. Par ailleurs, il finance les développements instrumentaux dans les laboratoires ainsi que les coûts de vols et de campagnes. Ceci a permis à l'activité ballon de devenir la deuxième au monde après celle des Etats-Unis.

### ■ Perspectives et besoins

Plusieurs domaines de recherche nécessitent de disposer de mesures depuis des ballons : la chimie et dynamique de la stratosphère, la chimie troposphérique et la dynamique de la troposphère.

■ Pour la chimie de la stratosphère, le ralentissement des programmes d'observations par satellite (après Envisat) s'accompagnera sans doute d'une utilisation de la télédétection depuis des ballons en remplacement, notamment à partir de nouveaux types de ballon permettant d'effectuer plusieurs jours, voire semaines, de mesures dans la stratosphère. Sans avoir la couverture spatiale et temporelle des observations spatiales, cette stratégie de mesure permettrait d'étudier certaines régions spécifiques de la stratosphère à moindre coût, en comparaison avec un programme satellite. Ceci implique un double effort, d'abord de développement de nouveaux ballons pouvant embarquer une centaine de kilogrammes, et ensuite de miniaturisation des concepts instrumentaux déjà existants.

■ Pour la chimie troposphérique, l'étude en altitude des précurseurs organiques et non organiques de la pollution oxydante et particulaire est cruciale et il conviendrait de mener une analyse comparative de l'apport des mesures ballon par rapport aux mesures aéroportées.

■ Dans la suite des récentes implications des ballons dans les campagnes tropicales, on peut prévoir que l'étude des couches limites atmosphérique et marine et de l'interface entre océan et atmosphère avec les ballons du type BPCL (petits ballons préssurisés pour la couche limite) et Aéroclippers restera un sujet de recherche très actif (campagne Vasco prévue en 2007). D'autres projets seront certainement proposés en région Méditerranéenne ou dans l'Océan Antarctique dans un cadre international. En complément à ces études des couches limites on peut noter la perspective nouvelle de pouvoir caractériser l'environnement thermodynamique (pression, température, humidité, vent) des zones étudiées à partir de sondes lancées depuis les ballons (système appelé « drift sonde »). Cette technique, en cours de test en collaboration avec le NCAR (National center for atmospheric research, USA), ouvrira très certainement de nouvelles perspectives à la communauté, en complément des sondages qui pourront être réalisés à partir du Falcon20 lors de grandes campagnes à thèmes météorologiques

(comme ce fut le cas pour Amma en 2006) et dans le cadre des programmes internationaux Medex et Thorpex.

### ■ Le contexte européen

En ce qui concerne l'intégration européenne de l'activité ballons, les campagnes récentes ont mis en évidence le besoin de renforcer la coordination avec les autres agences et équipes scientifiques mettant en oeuvre des ballons ou des capteurs sur ballons pour la recherche (principalement Suède, Norvège, Italie, Grande-Bretagne, Allemagne). Un premier pas vers la mise en place d'actions coordonnées au niveau européen vient d'être franchi avec la mise en place par le Cnes, d'un comité scientifique européen d'utilisateurs des ballons, et l'ouverture européenne de l'appel d'offres annuel du Cnes pour l'utilisation des ballons.

### ■ La Flotte

#### ■ État des lieux

Durant ces dernières décennies, la France a été une des nations majeures en océanographie, et cette place s'est notamment appuyée sur la disponibilité d'une flotte hauturière de grande qualité, équipée d'équipements extrêmement originaux et novateurs (comme le ROV grand fond). Malgré le rôle essentiel que joue la flotte nationale, la communauté française a souvent dû faire face à une programmation de cette flotte conflictuelle par rapport aux objectifs scientifiques. Au vu des enjeux politiques et environnementaux actuels, la France ne peut continuer à tenir son rang sans avoir à sa disposition une flotte hauturière de qualité, dédiée entièrement à la recherche scientifique. Cette recherche tend en outre à devenir fortement pluridisciplinaire : elle nécessite des navires de grande taille pouvant accueillir de nombreux scientifiques, des espaces en laboratoire conséquents, de l'instrumentation lourde et extrêmement sophistiquée.

■ La recherche en océanographie dispose actuellement de moyens lourds à la mer, divisés en 3 grandes catégories et gérés par l'Ifremer, l'IRD, l'Insu et l'Ipev (voir Annexe I) : les navires hauturiers, les navires de façades côtières, et les engins sous-marins. Il faut ajouter à cela, la flotte hauturière du Shom, mais pour laquelle l'accès des scientifiques est limité.

■ Des actions ont été menées ces dernières années pour une coordination nationale de l'ensemble de cette flotte. L'accès aux navires se fait par le biais de demandes de campagnes auprès des programmes de l'Insu, demandes qui sont ensuite examinées pour les navires hauturiers par la commission flotte nationale et ses commissions spécialisées et par les Comités inter régionaux (CIR) pour les demandes de navire côtier.

### ■ Perspectives et besoins

Pour la flotte hauturière, la remise à niveau à mi-vie de l'Atalante vers 2008 est en cours d'analyse et il est envisagé le remplacement du Suroît vers 2012 et la remise à niveau du Marion-Dufresne II.

■ Pour la flotte côtière, 3 navires de la façade atlantique arrivent en fin de vie (Côte d'Aquitaine, Thalia et Gwen Drez). Une réflexion inter-organismes, appuyée par la communauté, a conduit à initier la réalisation d'un bateau estuarien polyvalent. La communauté souhaite de plus le maintien d'un navire côtier pour Kerguelen.

■ Les discussions lors de l'exercice de prospective ont mis en avant le besoin d'un navire intermédiaire (type Suroît) entre les grands navires hauturiers et les navires côtiers ou de station pour aborder par exemple la thématique des transferts côte-large. Ce navire devrait avoir une capacité d'embarquement suffisante pour permettre la réalisation de campagnes pluridisciplinaires, la mise en œuvre des nouveaux outils de l'océanographie et la possibilité de travailler dans des zones éloignées des côtes (par exemple plateau continental).

■ En ce qui concerne les engins sous-marins, il y a actuellement une évolution des demandes pour des moyens autonomes plus légers et porteurs de modules scientifiques. Initié en France à l'Ifremer, un premier AUV (ASTERx) est en cours d'essai ; il pourra emporter des modules scientifiques. Actuellement sont prévus un sondeur multi faisceaux pour les Sciences de la Terre, un sondeur halieutique et un module de mesure physique (ADCP, CTD et fluorimètre). En parallèle, des études sur des engins autonomes plus petits et facilement utilisables, les gliders, sont en cours à l'Ifremer et dans plusieurs laboratoires.

### ■ Le contexte européen

Comme pour les avions, l'accès trans-national est maintenant possible par le biais d'échange de temps bateau. L'Ocean facilities exchange group (OFEG) regroupe quatre partenaires : français, anglais, allemand et néerlandais, les espagnols étant observateurs. Il faut cependant constater que la gouvernance au niveau européen est encore faible. Même si des efforts existent pour rationaliser l'offre de jours à la mer, les demandes sont toujours gérées au niveau national avec un financement des navires et des campagnes océanographiques essentiellement à la charge des pays. La flotte européenne (60 navires) est nettement supérieure à celle des États-Unis (35), chaque pays voulant garder ses moyens propres d'accès à la mer, au détriment d'un nombre suffisant de navires bien équipés. Néanmoins, la réflexion se poursuit et le Marine Board de l'ESF a décrit dans son document « Navigating the future » ce que pourrait être une stratégie de recherche marine au niveau européen, y compris les infrastructures nécessaires à cette recherche.

## Les instruments nationaux

Un effort important a été fourni ces dernières années pour rationaliser l'utilisation d'instruments souvent communs à plusieurs laboratoires ou même thématiques scientifiques. Ceci a abouti à mettre en place d'une part des parcs d'instruments gérés par une structure au service de l'ensemble de la communauté, et d'autre part à mettre à disposition du plus grand nombre des instruments très innovants pour lesquels les différents organismes impliqués aux côtés de l'Insu ont investi des moyens conséquents.

### ■ Les parcs d'instruments

La communauté des océanographes peut bénéficier, sous certaines conditions, des matériels de plusieurs parcs d'instruments à la mer : les parcs d'instrumentation océanographique de la Division technique de l'Insu et des organismes, IRD et Ifremer à Brest ; et le parc d'instrumentation lourde de l'Ifremer (Sondeurs multifaisceaux, ADCP, Pénétrateurs de sédiments etc.). Les CIR possèdent également un parc d'instruments disponibles en liaison avec l'utilisation des navires côtiers. Le maintien du parc d'instrumentation océanographique de l'Insu au meilleur niveau est une priorité. Un nouveau plan de jouvence, définissant les remplacements et les nouvelles acquisitions à effectuer doit être lancé.

■ De même, la mise en place de l'unité mixte de gestion des avions de recherche, Safire, s'est accompagnée de la création d'un parc d'instruments, dits de base, mis en œuvre par cette unité à la demande des utilisateurs. Un partenariat avec des experts scientifiques de ces mesures est par ailleurs fortement souhaité (étalonnage, filière de traitement des données, etc).

■ Enfin certaines communautés scientifiques ont fait un effort de recensement dans les laboratoires des instruments utilisables pour leur besoin et cela pourrait déboucher à terme vers la création de nouveaux parcs d'instruments. On peut citer par exemple les instruments dédiés à l'étude des propriétés physiques ou chimiques des aérosols.

### ■ Le statut des instruments nationaux

Certains instruments bénéficient déjà du statut d'instrument national. Il s'agit surtout pour l'instant de gros instruments aux applications multiples : par exemple les instruments de télédétection comme le lidar à rétro diffusion aéroporté Leandre (DT) ou le radar Ronsard (CETP). Il a été décidé de formaliser ce statut par la rédaction d'une charte qui a été discutée lors du colloque et qui définit les engagements respectifs des organismes et des laboratoires qui accepteront de rendre un instrument utilisable par d'autres chercheurs sous ce label (voir annexe 3).

### Plates-formes d'analyse et sites instrumentés

#### ■ Plates-formes d'analyse

Les traceurs chimiques et isotopiques étant d'excellents chronomètres ou marqueurs des processus, l'avancée de nos connaissances sur le fonctionnement des géodynamiques terrestres et océaniques est indissociable des progrès sur les performances des analyses du type spectrométrie de masse. Les prospectives scientifiques des programmes nationaux de l'Insu qui s'inscrivent dans le cadre des programmes internationaux Imber, Solas et Géotraces laissent présager des applications de plus en plus nombreuses en ce qui concerne la paléoclimatologie, la calibration de proxie entre présent et passé, les taux de transfert de matière et de masses d'eau dans l'océan actuel, l'étude des cycles d'éléments entre continents, océans côtiers, océan hauturier et sédiments. Les plates-formes d'analyse sont regroupées à l'échelle de la région et leur distribution géographique est la suivante : Nord-Pas de Calais (Lille), Ile de France (Paris, Gif), Bretagne (Brest), Aquitaine (Bordeaux, Pau), Midi-Pyrénées (Toulouse), Languedoc-Roussillon (Perpignan, Montpellier), Provence Alpes Côte d'Azur (Aix en Provence, Marseille, Villefranche-sur-mer). La répartition à venir des outils spectrométriques « haut de gamme » devra être attentive aux équilibres entre les régions et la prise en compte des besoins des groupes demandeurs.

#### ■ Plates-formes d'essai et de simulation

L'intérêt des plates-formes instrumentales permettant de simuler des processus physiques ou chimiques dans des conditions contrôlées et proches de celles qui sont rencontrées dans l'atmosphère ou l'océan n'est plus à démontrer. Il est donc essentiel de maintenir leur existence. Ceci a certaines implications :

► **Le maintien d'un partenariat fort avec les autres organismes** comme l'Ifremer qui dispose de bassins d'essai ou de caissons hyperbares, ou comme Météo France qui utilise une veine hydraulique pour des études de turbulence appliquées, par exemple, à l'impact des effets de sillages sur les mesures atmosphériques.

► **Une réflexion, pour certaines plates-formes, sur les besoins de jouvence ou d'amélioration des performances.** On peut évoquer, par exemple, le cas de la soufflerie air-eau de l'IRPHE à Marseille.

► **L'ouverture à une utilisation dans un cadre européen.** Le cas de la plaque tournante Coriolis du LEGI à Grenoble, qui permet l'étude de la dynamique des fluides dans des conditions proches des conditions atmosphériques est un bon exemple de l'apport de cette ouverture car elle bénéficie du Programme « Improving Human Research Potential ».

► **Un développement instrumental adapté à ces plates-formes.** On peut citer les efforts faits en France

pour développer des chambres de simulations des processus chimiques en phase gazeuse ou en présence de particules. Les moyens analytiques nécessaires doivent souvent posséder des performances similaires à celles qui sont requises pour les mesures atmosphériques avec comme conséquence un besoin très fort d'échange d'expertise entre les équipes travaillant au laboratoire et celles travaillant sur le terrain. Un tel partenariat doit être encouragé au sein des programmes.

■ Un nouveau type de plates-formes fait son apparition pour les études du milieu marin, il s'agit des systèmes expérimentaux contrôlés du type mésocosme. L'objectif est de mesurer et d'analyser les effets des forçages climatiques et anthropiques sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins. En effet, ils permettent d'isoler une masse d'eau et ses constituants et de leur appliquer séparément ou de façon combinée différents facteurs physiques, chimiques ou biologiques. Ces moyens, largement utilisés en Amérique et Europe du Nord, sont encore à l'état embryonnaire en France.

#### ■ Les sites instrumentés

Plusieurs sites de mesures apparaissent comme de plus en plus utilisés non seulement pour favoriser des observations sur le long terme dans le cadre des Observatoires de recherche en environnement (ORE) ou des Services d'observation (SO) mais aussi du fait de la masse critique des instruments qui y sont déployés ou de la spécificité géographique du site. Cet état de fait doit être pris en compte par les organismes et incite à mener une réflexion sur leur développement indépendamment de la notion de Service d'observation.

■ Pour les observations atmosphériques, on peut identifier cinq actions probables à court et moyen terme :

► La station Concordia au centre du plateau antarctique, qui a ouvert en 2004 et qui doit permettre de nouvelles observations atmosphériques, au cœur du vortex polaire, et glaciologiques avec le forage Epica couvrant 900 000 ans. Une programmation scientifique en concertation européenne est certainement la première priorité.

► Le Site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique (Sirta) qui est reconnu comme un site d'observation des nuages et des aérosols par télédétection et aussi pour son couplage fort avec les observations spatiales de la mission « A-Train ». Sa pérennité permettra d'assurer la poursuite de la contribution française au réseau international de « super sites » pour l'étude des interactions entre nuages et aérosols dans le cadre de Gewex.

► La station du Puy de Dôme qui permet de déployer des instruments d'analyse *in situ* de l'atmosphère nuageuse et bénéficie de la compétence instrumentale du Lamp dans ce domaine. L'extension des activités vers la caractérisation chimique des gouttes et des aérosols est fortement souhaitable.

► Le site Lannemezan/Pic du Midi qui offre la possibilité d'associer à des mesures sur un site d'altitude (le Pic du Midi) des observations radars et radio métriques. La proximité géographique des chercheurs du Laboratoire d'aérodynamique, installés au Centre de recherche atmosphérique de Lannemezan, est un atout supplémentaire. La pérennité d'un tel site doit donc être assurée par des moyens techniques et humains.

► Le site de l'Observatoire de Haute Provence qui associe un ensemble inégalé de mesures par télédétection optique ainsi qu'un radar stratosphère-troposphère. Il accueille régulièrement des campagnes de mesures en plus de son activité de Service d'observation au sein du NDACC (Network for the detection of atmospheric composition change). La perspective d'un programme d'étude de la Méditerranée est également une raison supplémentaire pour permettre à ce site de continuer à accueillir des missions scientifiques dépassant les seuls objectifs du NDACC.

■ Pour l'océanographie, les stations marines sont le lieu privilégié pour disposer de laboratoires de terrain dédié à l'observation et à l'expérimentation. Le dispositif national des stations marines académiques se décline aujourd'hui en cinq observatoires océanologiques de l'Insu en partenariat avec les universités (Banyuls-sur-Mer (UPMC), Brest (UBO), Marseille (Aix Marseille), Roscoff (UPMC), Villefranche-sur-Mer (UPMC)) dans lesquels se concentre la plupart des recherches océanologiques du pays et en 9 établissements universitaires de moindre importance qui complètent le dispositif de support aux recherches littorales et côtières (Arcachon, Concarneau, L'Houmeau, Sète, Luc-sur-Mer, Moorea, Wimereux, Bailleron, Yeu). Des efforts particuliers sur les équipements nouveaux et les jouvences, notamment de la flottille côtière, sont indispensables. Comme ces besoins sont souvent communs, une coordination avec les dispositifs parallèles de l'océanographie côtière opérationnelle sous la gestion des autres organismes nationaux (Ifremer, BRGM) est fortement recommandée au travers notamment du Réseau national des stations marines (RNSM) animé par l'Insu.

## Les services labellisés Insu

### ■ État des lieux

Depuis le colloque d'Hourtin en 1993, la CSOA a mis en place un ensemble cohérent de services labellisés constitué par (voir Annexe 2) :

- 8 services d'observation de l'atmosphère ;
- 6 services d'observation de l'océan ;
- 1 service d'observation climatique ;
- 2 codes numériques communautaires ;
- 1 centre d'archivage et de traitement de données.

■ Ce dispositif est maintenant assez bien adapté aux besoins de la recherche. Il ne devrait pas évoluer de

manière significative dans les prochaines années, surtout pour ce qui concerne les services d'observation. Toutefois, de nouvelles labellisations seront possibles si elles correspondent à un besoin environnemental indispensable, et impliqueront éventuellement dans ce cas de reconsidérer certains des services déjà existants.

■ La communauté française a rattrapé son retard initial et est actuellement très bien placée dans le maintien d'un dispositif à caractère « pérenne » et généralement bien reconnu et inséré au niveau international (parmi les 15 services d'observation, 13 font partie de réseaux internationaux). Sauf pour un des SO de l'atmosphère, tous ces services sont placés sous la responsabilité des OSU, dont plus de 60% à l'OMP et à l'IPSL. Un point remarquable est le potentiel humain associé à leur fonctionnement. On a estimé lors de leur réévaluation en juin 2005 un équivalent temps plein égal à 22 chercheurs (dont 9 du CNAP) et de 43 ITA (dont 30 du CNRS).

■ Un point très positif a été la création en 2005 et 2006 par la Direction de l'enseignement supérieure d'un nombre significatif de postes CNAP dans la section SCOA, qui vont pour une partie d'entre eux, permettre d'améliorer l'animation et l'encadrement scientifique de ces services.

### ■ Perspectives et recommandations

► Mettre en place une véritable contractualisation inter-organismes des coûts de fonctionnement et d'investissement. Cette contractualisation existe déjà dans l'Enseignement supérieur à travers les OSU et le plan quadriennal.

► Procéder à une évaluation quadriennale de ces services par la CSOA pour le maintien ou non de la labellisation, en tenant compte non seulement de la qualité du service, mais aussi de l'évolution des besoins. C'est sur la base de cette évaluation que le Comité scientifique de l'Insu pourra ou non reconduire le label.

► Faire valider par la CSOA les tâches de service associées au fonctionnement de chaque service labellisé de manière à évaluer les besoins en personnel (personnel CNAP et ITA) et transmettre ces informations aux organismes concernés.

► Mettre en place un plan de recrutement pluriannuel et inter-organismes permettant de conserver le potentiel humain nécessaire à ces services. La conservation de ce potentiel humain nécessite par ailleurs que l'importance des tâches de service soit reconnue par les instances d'évaluation des différentes catégories de personnels, et que la spécificité de ces tâches ne nuise pas à une nécessaire évolution des métiers. Toute nouvelle labellisation doit prendre en compte les besoins nécessaires pour le fonctionnement du service.

► Maintenir et actualiser le portail d'accès aux données des services d'observation mis en place par Medias France. La CSOA doit en parallèle maintenir une base descriptive des services labellisés, de leurs

## • Organisation de la recherche

moyens humains et matériels et des tâches de service associées.

► Accroître la visibilité internationale, soit par la participation à des réseaux, soit par une meilleure mise à disposition des données.

► Savoir remettre en cause le dispositif des services d'observation en fonction des évolutions scientifiques d'une part et de l'apparition de besoins opérationnels d'autre part. C'est en particulier le cas pour les différents services publics européens mis en place dans le cadre de GMES (Global monitoring of environment and security). Certains de nos services ont vocation à intégrer le dispositif GMES.

► Réfléchir à la possibilité de labelliser les sites instrumentés à vocation nationale mettant à disposition de la communauté des instruments et une infrastructure pour des expériences visant à la compréhension de processus plutôt que pour l'observation à long terme.

### La Recherche et Développement (R&D)

#### ■ État des lieux

La Recherche et Développement (R&D) est indispensable pour faire émerger de nouveaux projets instrumentaux ou réduire les difficultés lors de leur conception, développement, et réalisation. La mise en place de cette politique de R&D dans le cadre de l'Insu nécessite une analyse des besoins technologiques et des métiers associés, et une réflexion sur la mise en place de certains outils de gestion de ce volet de la recherche dans un cadre Insu.

■ Le soutien financier au travers des demandes de moyens mi-lourds a permis une réelle activité de R&D pour le développement d'instruments destinés aux mesures atmosphériques, notamment la mesure des gaz et des aérosols, ainsi que pour le développement des techniques radar-lidar. L'activité ballon n'a pas reçu un soutien significatif de R&D de la part de l'Insu au cours des 5 dernières années sauf en ce qui concerne le développement du spectromètre à diode laser (SDLA) pour l'étude de certaines espèces chimiques par diode laser embarquée, projet qui n'aurait pu voir le jour sans le soutien actif de la Division technique de l'Insu (DT-Insu). Dans le domaine de l'océan (biogéochimie et dynamique), il n'y a pas eu de financement mi-lourd pour des actions de type R&D. La demande est, dans ce domaine, par ailleurs très réduite (quelques projets sur 4 ans). Toutefois un soutien de la DT-Insu a été fourni pour le développement de certains capteurs et adaptation sur de nouveaux porteurs (mesure du pCO<sub>2</sub> par un capteur Carioca sur la bouée Marel, sur navire d'opportunité).

■ Les laboratoires sont le lieu privilégié pour le développement instrumental. Ceci nécessite une politique de mise en place de moyens humains et de

moyens lourds conséquents. Par le passé ceci a par exemple été le cas des unités disposant d'un soutien de plusieurs organismes (les laboratoires dits « spatiaux » soutenus par le Cnes, l'implication forte du CEA dans le LSCE ou encore le soutien de Météo France au travers de l'activité du CNRM). Si la R&D bénéficiant du soutien des programmes européens est restée marginale dans la communauté des expérimentateurs de terrain (sauf dans le cas du programme Mozaic), elle est très présente dans la communauté travaillant sur les études de laboratoire.

■ La division technique de l'Insu joue un rôle central dans la réalisation et la mise en place d'instruments opérationnels dont les prototypes ont été développés dans les laboratoires ou sont issus d'appels à idées. La DT-Insu permet de regrouper en un seul lieu les différentes compétences requises pour le développement et le suivi instrumental. Par ailleurs son ouverture sur plusieurs thématiques allant de l'observation de la surface, à celle de l'océan ou de l'atmosphère en passant par les objets astronomiques permet de faciliter un transfert rapide des innovations technologiques entre les différentes communautés concernées.

#### ■ Perspectives et besoins

L'analyse de la prospective des programmes scientifiques de l'Insu souligne l'importance d'une démarche active en R&D instrumentale. On peut par exemple citer quelques pistes de travail :

► Améliorer l'emploi des capteurs sur des plateformes permettant une bonne couverture spatiale et temporelle (satellite, ballons longue durée, avion haute altitude, avions commerciaux). Ceci passe par l'utilisation de technologies permettant une grande miniaturisation et une bonne autonomie des composants.

► Développer l'observation dans le domaine de la télédétection avec notamment le développement de radars fonctionnant à fréquences plus basses (bandes P et L) pour sonder certains milieux (forêt, glace, ...), et de la radiométrie micro-onde aéroportée, en support à la future mission satellitaire Smos de l'ESA.

► Dans le domaine des instruments aéroportés, développer l'adaptation de capteurs microphysique des nuages, aérosols pour leur utilisation en haute altitude (nuages froids), développer les technologies pour accéder à la composition chimique des noyaux glaçogènes et des aérosols par spectrométrie de masse, étendre les mesures aux petits cristaux (<10 µm). Pour la chimie gazeuse, la maîtrise de la spectrométrie de masse sur avion et l'application des techniques à base de diode laser apparaissent comme des priorités. Enfin pour la radiométrie, l'accent sera mis sur le développement d'imageurs (de type Polder) dans le moyen infra-rouge et (de spectroradiomètres (évaluation des coefficients de photolyse).

► En ce qui concerne l'océanographie, de nombreux capteurs chimiques ou biologiques existent, ou sont

en cours de développement dans d'autres domaines (industrie chimique, médecine, agroalimentaire). Ils pourraient présenter à terme des outils pertinents pour la mesure de grandeurs importantes comme le CO<sub>2</sub> et le pH. Une attention particulière doit aussi être portée aux technologies issues des sciences du vivant, avec en particuliers l'analyse de la composition des communautés par puce à ADN (phylochips).

► En parallèle à une R&D sur les capteurs, il ne faut pas négliger les besoins en nouveaux outils d'échantillonnage. À l'interface océan-atmosphère, l'échantillonnage de la microcouche et des quelques mètres sous-jacents nécessite le développement de nouveaux préleveurs ainsi que l'adaptation et la mise en œuvre de micro capteurs appropriés tels que ceux déjà utilisés pour l'étude de l'interface eau-sédiment. La collecte de grands volumes d'aérosols à des fins d'expérimentation est aussi un défi technologique à relever dans ce domaine.

■ En ce qui concerne le soutien à ces actions de R&D, une vision d'ensemble des rôles des laboratoires, de la Division technique de l'Insu et des organismes associés à l'Insu est nécessaire et permettra de rationaliser les efforts. L'Insu doit favoriser la mise en place d'une veille technologique permettant la circulation de l'information à partir et vers les autres départements du CNRS, et encourager quand c'est possible le développement conjoint, ou le transfert et l'adaptation, de capteurs existants mesurant des grandeurs prioritaires (gaz d'intérêt climatique, contaminants chimiques, identification biologique...). Cette veille est impossible à réaliser de façon systématique par les chercheurs. Elle est également difficile à mener par les ingénieurs ou techniciens impliqués dans la réalisation. La poursuite des colloques associant chercheurs et ingénieurs pour échanger leur savoir faire sur une technologie, mais sans limitation à un thème de recherche particulier, semble la seule voie possible. L'ouverture des programmes à plusieurs départements favorisera aussi ce travail de veille technologique.

■ Les succès rencontrés dans le développement de la R&D au sein des unités bénéficiant d'un soutien de plusieurs organismes montrent l'importance d'une action concertée entre les différents acteurs. Ceci nécessite l'organisation d'appels d'offre communs, de colloques de prospective communs, ou encore d'une concertation entre le CNRS et les autres organismes pour évaluer l'apport des structures propres permettant le développement de la R&D. On citera, par exemple, les centres de compétences techniques du Cnes ou le Groupement de recherche biocapteur de l'Ifremer, les ateliers expérimentation et instrumentation (AEI) organisés par l'Insu, l'Ifremer et Météo France.

■ Afin d'améliorer le développement de la R&D, il est nécessaire de mettre en place des structures de suivi de projets permettant de s'assurer de la faisabilité

technique et de la disponibilité des financements pendant la durée des projets. Actuellement, le financement du développement instrumental n'est pas facilement réalisable par les programmes de l'Insu ou par les financements d'équipements « mi-lourds ». L'interaction forte entre programmes et boîtes « mi-lourds » finançant traditionnellement la R&D est une solution possible ; elle devrait être favorisée avec la création du programme LEFE.

■ Un autre besoin concerne la conservation des métiers et du savoir-faire permettant cette R&D. Puisque la R&D relève plutôt des laboratoires (à cause de la proximité chercheur-ITA), il faut identifier les « laboratoires ressources » dans différents domaines (chimie, bio-optique, biologie moléculaire, hyperfréquences ...), et s'assurer que les compétences dans ces laboratoires puissent être maintenues.

■ Enfin il faut souligner l'intérêt du transfert vers l'industrie, pour une pérennisation et une production en nombre de l'instrumentation initiée dans nos laboratoires. Un effort important doit être fait dans cette voie encore trop peu empruntée.

## L'observation spatiale

### ■ Les satellites

La communauté océan-atmosphère bénéficie de satellites contribuant à lui fournir des mesures de grande importance sur l'environnement fluide de la Terre. En parallèle aux satellites météorologiques opérationnels, de nombreux instruments « de recherche » ont été ou sont actuellement développés :

► L'étude des interactions complexes entre les aérosols, les nuages et le rayonnement bénéficie des instruments Polder sur les satellites japonais Adeos et des missions spatiales de l'A-train (Aqua, Calipso, Cloudsat, Parosol). La communauté scientifique française est fortement impliquée dans ces expériences internationales qui devraient se poursuivre avec la mission Earthcare prévue vers 2012.

► L'étude du cycle de l'eau et des précipitations constitue un autre axe de recherche important, car ce n'est que depuis l'espace que l'on peut observer globalement les précipitations sur les océans et suivre sur toute leur durée de vie les phénomènes convectifs tropicaux ou les dépressions extra-tropicales. C'est l'objet de la mission franco-indienne Megha-Tropiques en cours de réalisation pour un lancement à la fin de la décennie.

► L'observation du champ de vent est un objectif difficile. Les diffusiomètres (radar utilisant la diffusion sur les vagues) ne fournissent qu'une mesure à la surface des océans et le suivi du déplacement des pixels nuageux entre deux images de satellites géostationnaires ne permet pas d'établir un champ de vent homogène. Le lancement en 2008 d'un instrument sensible au déplacement moyen des

## • Organisation de la recherche

molécules d'air (lidar Doppler) à bord du satellite ADM-Aeolus par l'ESA sera une réelle avancée.

► Les missions de chimie atmosphérique ont tout d'abord été dédiées à l'étude de la stratosphère. Les instruments spatiaux actuels ou à venir combinent différents types de sondages (limbe, nadir) et assurent une complémentarité des espèces mesurées sur une même plate-forme. Les perspectives s'orientent maintenant vers des missions relatives à la chimie de la troposphère et plus précisément à la pollution. La communauté est partagée sur la priorité respective de répondre aux besoins d'observations géostationnaires et de réaliser un démonstrateur en orbite basse. La perspective d'une mission d'étude du CO<sub>2</sub> (complémentaire à la mission américaine OCO) suscite également des travaux exploratoires.

► Dans le domaine océanographique, les paramètres couramment observés de façon opérationnelle sont la température de surface, les réflectances marines et l'état de la surface de la mer. La donnée altimétrique, initialement fournie par la mission Topex-Poséidon, est actuellement assurée par le programme Jason-1 et, d'ores et déjà, les missions Jason-2/OSTM (Ocean surface topography mission) et Altika sont en préparation. La continuité de deux missions altimétriques complémentaires est essentielle pour obtenir l'échantillonnage spatio-temporel adéquat pour l'observation de la variabilité océanique, tant dans le domaine côtier que dans le domaine hauturier. Ce double besoin est renforcé par la nécessité d'observer le Groenland et l'Antarctique, ainsi que par l'émergence de la glaciologie et de l'hydrologie, qui nécessitent elles aussi un bon échantillonnage spatio-temporel. La mission Swimsat (Surface waves investigation and monitoring by satellite), permettra de mieux documenter la surface océanique et les échanges de quantité de mouvement entre atmosphère et océan, grâce aux mesures des propriétés spectrales des vagues et du vent de surface.

► Aucun capteur satellite n'est actuellement capable de mesurer la salinité, qui est pourtant l'une des variables d'état de l'océan ; la salinité contrôlant la densité de l'eau et jouant donc un rôle à la fois en termes de niveau des océans et de circulation. Deux missions complémentaires sur ce thème, Smos (Esa-Cnes-CDTI) et Aquarius (Nasa-Conae) sont en cours de réalisation, SMOS devant être lancée début 2008.

### ■ L'exploitation des données spatiales

La qualité et la quantité des données provenant de l'observation spatiale, aussi bien opérationnelle qu'expérimentale, a conduit au développement de plusieurs services au niveau international et national. Au niveau européen par exemple, les Satellite application facilities (SAF) ont été mis en place avec l'appui des météorologies nationales et d'Eumetsat. Les centres de données américains sont largement utilisés par une grande partie de la communauté française.

■ Au plan national, les organismes ont progressivement mis en place une politique de développement de pôles de compétence thématique, regroupant archivage, traitement et distribution des données et produits spatiaux à des fins scientifiques, collecte et mise à disposition des autres données d'observation ou de modélisation pertinentes avec le thème concerné. Ces thèmes sont la chimie atmosphérique (Ether), nuages aérosols rayonnement eau (Icare), surfaces continentale (Postel).

■ L'océanographie spatiale est un cas particulier : la communauté française est organisée autour de plusieurs centres de données qui jouent le rôle de pôles de compétence thématique. Il existe en France deux grandes bases de données spatiales en océanographie. Ce sont :

► Le Centre de données Aviso-Altimétrie qui s'est constitué à partir de 1992 autour de la mission Topex-Poséidon, puis a progressivement évolué pour prendre en charge les besoins des missions du Cnes Jason-1 et 2.

► Le centre de traitement, d'archivage et de distribution des données « basse cadence » (altimètre, diffusiomètre) des satellites européens ERS-1 et ERS-2, le Cersat, qui a été mis en place au centre Ifremer de Brest, avec le soutien du Cnes, du CNRS, de Météo France, et de l'Esa.

### L'exploitation des données multi sources

Au cours des dix dernières années, les recherches sur les problèmes géophysiques et environnementaux ont fait de plus en plus appel à des données d'origine et de nature très variées (données instrumentales locales, données de campagnes multi instrumentales, données de satellites, sorties d'expériences de modélisation). La création de plusieurs bases de données, dont des centres thématiques préconisés lors de l'exercice de prospective précédant à Brest en 2000, a déjà été très profitable à la communauté océan-atmosphère. Ces centres thématiques, comme nous l'avons déjà évoqué, sont les suivants :

► Ether, service de gestion et de valorisation des données de chimie atmosphérique qui apporte aussi un soutien au réseau d'excellence européen Accent et au projet GMES sur la thématique chimie atmosphérique. Actuellement, Ether évolue pour intégrer des fonctions de valorisation de données, d'aide à l'utilisation des produits par une large communauté.

► Icare, pôle de compétence thématique destiné à fournir un ensemble de données, produits et services permettant une utilisation optimale des systèmes d'observation dans la thématique « aérosols-nuages-rayonnement-eau ». Il met déjà à disposition les données de plusieurs missions spatiales, en particulier Modis et Parasol et il archivera, validera et distribuera les données et produits de la mission Calispo, associant mesure lidar

et radiométrique. Il se développe également en fonction de la demande des utilisateurs de données spatiales ou non, en relation avec ces thématiques.

► Postel, pôle de compétence thématique concernant les surfaces continentales. Des premières activités de réalisation et de distribution de produits bio géophysiques ont eu lieu dans ce cadre en se focalisant dans un premier temps sur les échelles continentale à globale. Au plan européen, Postel est appelé à jouer un rôle comme élément de service GMES.

■ Ces pôles, auxquels il faut ajouter les centres dédiés à l'océanographie, s'appuient à la fois sur des centres opérationnels de traitement des données, et sur l'expertise des laboratoires, regroupés en centres d'expertise, qui préparent et valident les algorithmes de traitement.

■ Il est important maintenant de mieux faire connaître et de coordonner ces services, de les compléter lorsque des domaines ne sont pas couverts, de les insérer dans le contexte international, et d'assurer un accès optimum à divers types d'utilisateurs. Il est important que la politique dans ce domaine soit définie au niveau inter-organismes. Il est également souhaitable que des régions, des ministères comme le MEDD, et tous les secteurs concernés par les « impacts » puissent être associés à la réflexion et à l'action.

■ Dans l'immédiat, la mise en place et le développement d'un portail d'accès CNRS-Insu vers les différentes bases de données concernant les thématiques océan-atmosphère, mais aussi « Surfaces continentales » est nécessaire. Il faut bien sûr aussi poursuivre le développement des trois pôles de compétence thématiques, tout en assurant la compatibilité entre ces services, et les services préexistants (comme par exemple Satmos). La démarche doit concerner aussi les données des services d'observation : centralisation de l'information sur les données disponibles et les moyens d'y accéder, et assurer la pérennisation des données. Un portail dédié aux services d'observations devrait permettre un accès aisé même aux utilisateurs non-spécialistes.

■ Dans les prochaines années, des réflexions sont à mener rapidement sur :

► La mise en place d'un pôle de compétence du même type que ceux qui sont décrits ci-dessus pour l'océanographie biologique. Le pôle doit se développer en coordination avec les moyens déjà mis en place efficacement pour l'océanographie physique.

► Pour les campagnes de mesure, les services et les réseaux d'observation : renforcement et coordination des actions au niveau des laboratoires et instituts (bases de données gérées par l'IPSL, Medias-France, ...).

■ Pour les simulations de modèles, il serait nécessaire de mettre en place un catalogue des simulations disponibles et les moyens d'y accéder.

► Pour l'ensemble des bases existantes ou envisagées, la pérennisation des données nécessitera de mettre en place des moyens spécifiques.

■ Afin de faciliter l'utilisation des bases et services de données, il convient également :

► De renforcer l'obligation de plan de gestion de données pour tout projet nouveau (à intégrer dans les appels d'offres de tous les programmes).

► De préciser la fonction de chaque service et d'assurer l'homogénéisation et l'interopérabilité des bases lorsqu'elle apparaît nécessaire aux besoins scientifiques. De ce point de vue, l'utilisation des avancées techniques informatiques du type « grilles de données » doit être poursuivie et généralisée dès que le caractère opérationnel sera assuré. Toutes ces actions nécessitent un travail d'enquête et de mise en place important. La nomination d'un chargé de mission à l'Insu en 2005 est une action très positive.

► De regrouper des moyens au niveau de centres techniques de taille suffisante (une masse critique de l'ordre de 10 ingénieurs) même si le développement scientifique de base et la validation des produits (sans parler de l'exploitation scientifique) restent décentralisés au niveau des laboratoires. Les centres thématiques aboutissent déjà à de tels regroupements de moyens, mais ils sont également à encourager au niveau de groupes de laboratoires, où ils doivent permettre un gain d'efficacité et des économies d'échelle.

■ Les recrutements nécessaires comportent des ingénieurs informaticiens et des « thématiciens » qui doivent permettre à la fois de constituer des services « centralisés » techniquement efficaces et de maintenir un rôle scientifique amont et aval approprié dans les laboratoires.

## Le calcul intensif

Une caractéristique primordiale du calcul intensif est le regroupement des chercheurs autour d'un petit nombre d'outils logiciels communautaires spécialisés, de taille quasi-industrielle, par exemple les modèles de circulation générale atmosphérique LMD-Z ou Arpège, le modèle atmosphérique de méso-échelle Méso-NH, et le modèle de circulation générale océanique OPA. Un trait commun de ces grands modèles est qu'ils alimentent de plus en plus la recherche amont qui prépare les programmes de prévision opérationnelle (Mercator, Arome). En outre, le calcul intensif bénéficie de l'accompagnement favorable apporté par les projets d'infrastructure fédérale de partage interdisciplinaire de ressources ou de données, comme la grille Européenne Egee pour les calculateurs moyens, ou le projet Icad.

■ La tendance va vers une modélisation des systèmes naturels dans leur ensemble, accentuant les possibilités de rétroactions multidisciplinaires et multi échelles. Cette tendance se décline de façon un peu différenciée selon trois thèmes généraux :

► Axe premier, l'étude de la variabilité climatique naturelle d'échelles décennales à millénaires, ainsi

## • Organisation de la recherche

que celle des scénarii d'impact de l'activité humaine impliquent d'entreprendre des simulations complexes comportant à la fois les compartiments glace-océan-atmosphère-végétation. De plus en plus, il s'agit aussi de représenter des espèces chimiques nombreuses et de s'attaquer à l'analyse des grands cycles (carbone, soufre, etc...) et de leurs perturbations anthropiques. La recherche climatique a désormais pour objectif la modélisation couplée globale du "système Terre". Prévoir l'évolution future du climat et répondre aux questions posées à la société sur le réchauffement climatique suite à l'augmentation des gaz à effet de serre est entièrement dépendant de l'accès à des moyens de calcul intensif et passe par l'augmentation de la puissance de calcul d'un facteur de 10 à 1 000 par rapport aux moyens actuels afin de pouvoir intégrer la complexité du système, augmenter la résolution des modèles, affiner la représentation de processus clés. Ceci implique à la fois une augmentation de moyens au niveau national (5 teraflops soutenus dès 2006), et l'accès à une machine européenne (50 teraflops soutenus vers 2007-2008). Un projet de calculateur européen est proposé par l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni, il faut veiller à ce que sa définition prenne en compte les spécificités de la communauté climat.

► Seconde tendance lourde, la modélisation océanique qui nécessite une grande augmentation de la résolution des modèles. Ce secteur vient de connaître des succès importants : le modèle OPA de l'IPSL est devenu une référence en France mais aussi dans plusieurs pays Européens (surtout sa version fortement parallélisée qui donne des performances élevées) ; le projet de modélisation à haute résolution Clipper a ouvert la voie au programme Drakkar ; enfin, une excellente position internationale est tenue en assimilation de données avec des méthodes novatrices. La modélisation en océanographie s'est donc organisée à l'amont du programme Mercator afin d'accompagner le développement de l'océanographie opérationnelle. La prospective dans ce secteur chiffre, là aussi, le besoin d'augmentation de la puissance de calcul à des facteurs de 10 à 100, et celle-ci en bénéficierait au niveau national voire européen.

► Enfin, ce même besoin de très haute résolution se retrouve dans des termes voisins pour les simulations atmosphériques à méso échelle, où un modèle non-hydrostatique comme Meso-NH utilisera plusieurs millions de points pour quelques dizaines de variables afin de simuler les cas réels de la campagne météorologique Amma avec une résolution sub-kilométrique. Ces très hautes résolutions en météorologie conditionnent les progrès de la prévision des phénomènes extrêmes (crues, vents forts). La modélisation atmosphérique de recherche à

haute résolution a donc, elle aussi, ouvert la voie vers le projet Arome de Météo France pour la prévision météorologique opérationnelle à résolution kilométrique sur la France, dont la mise en service est prévue vers 2009. Dans ce secteur, les progrès envisagés en chimie atmosphérique (GMES, Chimère), ainsi qu'en modélisation des nuages et de la surface, nécessitent une augmentation de la puissance de calcul du même facteur, avec possibilité de participer à de grands exercices de modélisation européens.

■ L'analyse par domaine de l'état du calcul intensif conduit donc à formuler plusieurs recommandations :

► En premier lieu, que s'expriment les besoins d'augmentation en matière de calcul intensif au niveau national exploitables immédiatement par la communauté scientifique, ce qui permettraient de résorber notre retard considérable sur les moyens disponibles comparés à ceux de nos proches voisins en Allemagne et au Royaume-Uni.

► Le travail de remise à niveau de nos ressources nationales vient de débuter avec la décision du CNRS de lancer un renouvellement en deux tranches du calculateur vectoriel de l'Idris en 2006 puis 2007. Cette remise à niveau des capacités vectorielles (à parallélisme modéré) conditionne tout particulièrement la survie immédiate de la modélisation climatique française. La solution envisagée semble bonne, mais il faut dire clairement que la seconde tranche envisagée pour ce renouvellement est strictement indispensable à la réussite scientifique des projets de la communauté.

► Il restera alors à mener un travail semblable pour rénover les moyens de calculs scalaires-parallèles nationaux. Un effort est à l'étude au niveau du Cines, projet perçu très positivement. Mais les moyens scalaires-parallèles de l'Idris, d'usage essentiel pour l'océanographie, sont déjà très en retrait des centres voisins Européens (e.g. Mare-Nostrum, ECMWF... ). La communauté de modélisation OA souhaite que la remise à niveau de la machine scalaire-parallèle de l'Idris soit réalisée dès 2007.

► Enfin, l'inventaire par domaine scientifique montre également, pour plusieurs disciplines, le besoin d'avoir accès à des machines de puissance supérieure, de classe mondiale, dans le cadre de projets "Grand Challenge" pour des équipes très structurées et de forte visibilité internationale. Cette classe de ressources permettrait de collaborer avec les USA et le Japon, qui ont déjà accès à des moyens de calcul comparables. La communauté de modélisation soutient l'idée de pouvoir partager ce type de moyens au niveau européen, par exemple dans le cadre du projet de calculateur européen proposé par l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni, si les spécificités de la communauté sont bien prises en compte.



*Avions de recherche ATR-42 (à gauche) et Falcon 20 (à droite)  
© CNRS/Météo France Ph. Taburet*



*Décollage sous ballon stratosphérique  
d'un instrument d'analyse in situ.  
© CNRS*



*Navire hauturier l'Atalante © Ifremer*



*Navire de façade de l'Insu © Insu*



*Rosette issu du Parc d'instruments océanographiques  
© CNRS*



*Mise à l'eau de la première  
ligne de pièges à particules.  
© CNRS Photothèque  
Photographe :  
Fernandez, Camila /  
Rimmelin, Peggy*



*Photomètre solaire du Sirta © CNRS*



*Capteurs de rayonnement au  
Puy de Dôme © CNRS*



**Intérieur d'une baie embarquable Mozart © CNRS**



**Les différentes parties du capteur de pCO2 de type Carioca © CNRS**

**Formé en orbite héliosynchrone l'Aqua-train est une constellation de six satellites d'observation de la Terre remplissant chacun une mission différente dont les données combinées vont fournir de précieuses informations aux scientifiques sur l'évolution du climat. OCO(Nasa), Aqua (Nasa), Calipso (Nasa/Cnes), Cloudsat (Nasa/ASC), Parasol (Cnes) et Aura (Nasa) associent toutes les techniques de mesure actives et passives afin de mieux identifier et caractériser les différents types d'aérosols et de nuages et de mieux comprendre leurs effets directs et indirects sur le climat ou d'étudier le rôle des nuages polaires stratosphériques sur le trou de la couche d'ozone. Calipso et Cloudsat, lancés en avril 2006, viennent de rejoindre Aqua, Aura et Parasol, lancés respectivement en 2002, mi et 2004. OCO sera lancé en 2008. © Cnes**



**La mission Jason-1, lancée en 2001, embarque cinq instruments : l'altimètre Poséidon-2, instrument principal de la mission qui mesure la distance surface-satellite ; le radiomètre JMR, pour la mesure des perturbations dues à l'eau présente dans l'atmosphère ; ainsi que trois systèmes de localisation, Doris, LRA et TRSR. La charge utile de Jason-2 prévue pour être lancée mi 2008 sera presque identique à celle de Jason-1 et permettra d'obtenir une meilleure précision sur la mesure altimétrique, de l'ordre du cm. © Cnes**



**Le centre de calcul de l'Idris © Idris**

## ■ Annexe I : LISTE DES NAVIRES

NOM	Capacité d'accueil de scientifiques	Gestion	Remarques
<b>Flotte hauturière</b>			
Thalassa	25	Ifremer	
Atalante	30/33	Ifremer	
Suroît	14/17	Ifremer	
Pourquoi-pas ?	40	Ifremer	
Antea	10	IRD	
Alis	6	IRD	
Marion Dufresne II	110	Ipev	
Aastrolabe	48	Ipev	Terre Adélie
<b>Flotte côtière</b>			
Tethys	8	Insu	
Côte de la Manche	8	Insu	
Côte d'Acquaine	6	Insu	
Petits navires des stations marines	5-20	Insu	À la journée
Europe	8	Ifremer	
Thalia	6	Ifremer	
Gwen Drez	5	Ifremer	
La Curieuse	12	Ipev	Pour Kerguelen.
<b>Engins sous-marins</b>			
Nautilie	3	Ifremer	Jusqu'à 6000 m de fond
Victor		Ifremer	Téloguidé, jusqu'à 6000 m de fond

## ■ Annexe II : LISTE DES SERVICES D'OBSERVATION

SO/ORE	Objet du SO/ORE	Date Labellisation
Beam	Impact anthropique sur la phase aqueuse atmosphérique	ORE/SO : 2002
CESOA	Cycle du soufre aux hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère sud	ORE/SO : 2002
CTOH	Centre de topographie des océans et de l'hydrosphère (altimétrie)	SO : 1989
Esopa	Code communautaire océanique	CC : 2002
Dyfamed	Paramètres hydrologiques et biogéochimiques en mer Ligure	SO : 1995
Glacioclim /POG	Les glaciers, un observatoire du climat	ORE : 2002 SO : 2002
Idaf	Étude de la composition chimique de l'atmosphère tropicale et des dépôts secs et humides	SO : 1994 ORE : 2002
Meso-NH	Code communautaire atmosphérique	CC : 1997
Mozaic	Observation de la composition chimique de l'atmosphère à partir d'avions commerciaux	SO : 1994
NDSC/NDACC	Étude des changements physiques et chimiques de la stratosphère	SO : 1994
Oiso /Caraus	Variabilité des flux air-mer de CO <sub>2</sub> et inventaire de carbone anthropique	SO : 1997 ORE : 2003
PAES	Pollution atmosphérique gazeuse à échelle synoptique	SO : 2004
Pirata	Paramètres océaniques et atmosphériques en Atlantique Tropical	SO/ORE : 2003
Photons / Apronet	Paramètres de la colonne intégrée d'aérosol et humidité	SO : 1998 ORE : 2002
Ramces	Réseau atmosphérique de mesure des composés à effet de serre	SO : 1994 SO/ORE : 2002
Rosame	Mesure du niveau de la mer dans l'Indien Sud	SO : 1997
Somlit	Service d'observation en milieu littoral	SO : 1996
SSS	Salinité de surface	SO/ORE : 2002

## • Organisation de la recherche

### ■ Annexe III : Charte « Instrument national »

Cette charte est une convention entre un laboratoire et l'Insu pour la gestion des instruments ayant un statut national (matériel de campagne ou matériel lourd d'analyse).

#### ■ L'Insu s'engage à :

- ▶ Mettre à disposition du laboratoire les moyens financiers nécessaires au fonctionnement, à la maintenance et à la jouvence de l'instrument hors campagne, après expertise des instances compétentes de l'Insu (à préciser) ;
- ▶ Assurer le maintien du potentiel humain nécessaire au fonctionnement de l'instrument.
- ▶ Ne pas demander au laboratoire d'assurer les moyens d'accompagnements à l'utilisation de l'instrument (mission, fonctionnement, etc).

#### ■ L'Unité s'engage à :

- ▶ Assurer la maintenance de l'instrument ;
- ▶ Réaliser les mises à niveau de l'instrument proposées par la direction de l'Insu après avis de la CSOA ;
- ▶ Identifier un responsable et affecter le personnel technique nécessaire au fonctionnement, à la maintenance et, au besoin, à la mise à niveau de l'instrument ;
- ▶ Mettre l'instrument à disposition de chercheurs extérieurs à l'unité et fournir l'aide nécessaire :
  - Soit par une participation directe à la mise en oeuvre en campagne ou aux analyses en laboratoire dans le cadre de programmes soutenus par l'Insu ;
  - Soit par la fourniture d'une expertise de l'unité auprès des utilisateurs.
- ▶ Pour les matériels de campagnes sur le terrain, mettre à disposition des scientifiques les données collectées de niveau 0 (données brutes) et de niveau 1 (données instrumentales validées techniquement) lors de ces campagnes dans le délai qui aura été décidé de commun accord lors de l'acceptation de la campagne ;
- ▶ Fournir aux utilisateurs des conseils pour l'interprétation géophysique des données issues de l'instrument.

#### ■ Règles pour les utilisateurs

- ▶ Dans le cas des analyses de laboratoire, les utilisateurs acceptent un contrôle des responsables de l'instrument sur la qualité des analyses réalisées (préparation des échantillons, conditions analytiques, standards, traitement des données, etc.).
- ▶ Dans le cas d'instruments de mesures très spécifiques, les utilisateurs acceptent un contrôle des responsables de l'instrument sur la qualité du traitement des données.
- ▶ Les règles de citation et co-signature d'articles résultant de l'utilisation des mesures de l'instrument devront être explicitées lors d'établissement de la convention particulière de mise à disposition de l'instrument.
- ▶ Le temps de mise à disposition à d'autres laboratoires devra être clairement défini lors de l'établissement de la convention particulière de mise à disposition de l'instrument.
- ▶ En cas de dégradations de l'instrument, les utilisateurs s'engagent à apporter le financement pour la remise à niveau correspondante.

#### ■ Calendrier prévisionnel

- ▶ Un calendrier prévisionnel annuel de fonctionnement (ou un pourcentage de temps) réparti entre l'utilisation propre du laboratoire et le temps clairement établi qui peut être alloué à d'autres laboratoires sera établi en commun accord par l'Insu et le laboratoire.

#### ■ Règles de suivi et dénonciation de la convention

- ▶ L'Insu et l'unité désignent chacun un correspondant pour le suivi de la convention.
- ▶ La convention est prolongée chaque année par tacite reconduction.
- ▶ Une revue annuelle de l'instrument et de sa mise à disposition comprenant le bilan (activité et budget) et les nouvelles demandes sera réalisée sous la responsabilité de l'Insu (Comité de suivi dépendant de la CSOA).
- ▶ Tout litige éventuel sera réglé au niveau de la direction de l'Insu.

ITA

Chercheurs

CNRS

Météo France

IRD

INF

MENRT

Universités

CEA

Cerfac

Cnes

Cnap

Showm

Ifremer

IV

La communauté  
scientifique

## Ressources humaines

### Contours et méthode de l'étude

Ce travail repose sur l'exploitation de la base Labintel du CNRS, outil fondamental pour la connaissance des personnels en terme de démographie mais aussi en termes de métiers ITA et IATOS. Nous avons cherché à avoir une vision détaillée des activités des personnels de façon à mieux caractériser les forces disponibles en terme de capacités scientifique et technique, de répartition dans les différentes unités et sous disciplines du domaine, d'âge et de localisation géographique.

■ Pour construire la base de données « chercheurs », nous avons soumis à chaque unité mixte de recherche (UMR) concernée, un tableau détaillé contenant une liste de rubriques non exclusives portant sur le domaine étudié et ses sous domaines, les paramètres étudiés pour chaque domaine, l'approche utilisée, le mode d'acquisition des données utilisées, les échelles de temps et d'espace couvertes, l'implication en recherche et développement. Nous avons enfin proposé quelques mots-clés (climat, processus, cycles, anthropique, extra-terrestre). Le détail des rubriques est donné en annexe, à la fin de ce chapitre. Tous les chercheurs considérant qu'ils travaillaient de façon importante pour les disciplines OA ont répondu à l'enquête. À partir des tableaux renvoyés par les unités, nous avons constitué et exploité statistiquement un tableau résumé dont un extrait est présenté ci-après.

■ Pour le collège « ITA/IATOS », la base de données a été construite à partir d'extractions Labintel corrigées et complétées de façon précise par chaque unité. Un effort particulier a porté sur les activités professionnelles, définies à partir des emplois-types de l'observatoire des métiers, ce qui permet des traitements statistiques fins via un code à deux lettres et trois chiffres contenant la branche d'activité professionnelle, le grade et enfin le métier spécifique de chaque personnel. L'enquête a porté sur :

- ▶ Les personnels permanents en poste ;
- ▶ Les personnels partis au cours des 4 dernières années ;
- ▶ Les CDD non « recherche spatiale ».

Remarque : les CDD « recherche spatiale » avaient fait l'objet d'une requête précédente, ce qui nous a permis de les inclure dans l'exploitation des résultats.

### Personnels pris en compte

Les unités relevant de l'ex-département Sciences de l'Univers (SDU) et en particulier de sa Division océan-

atmosphère (OA) étant multi-organismes, ce travail a porté sur l'ensemble des personnels, quel que soit leur organisme de rattachement. En nombre de personnels affectés, les principaux organismes partenaires du CNRS sont l'Education Nationale et l'Université, Météo France, le CEA, l'IRD, l'Ifremer, le Cnes et le Cerfacs.

#### ■ Unités gérées officiellement par la division OA (ex SDU du CNRS) :

▶ Chercheurs / enseignants chercheurs (EC) : nous avons pris en compte tous les chercheurs travaillant de façon significative à des thématiques OA. Ils relèvent essentiellement de la section 19 du Comité national, mais pas uniquement.

▶ ITA / IATOS : nous avons pris en compte l'ensemble des personnels considérés comme tels par leur unité, puisque, suivant les organismes, la distinction entre les fonctions de chercheurs et d'ITA n'apparaît pas dans le grade et doit être précisée. Pour une unité donnée et compte tenu de l'évolution potentielle des besoins techniques ou administratifs, nous n'avons cherché à recenser les personnels affectés à des fonctions spécifiquement OA. Si une distinction devait être faite, elle le serait en terme de prorata ITA-chercheurs.

#### ■ Unités non gérées par la division OA (autres divisions du département SDU et autres départements), les personnels ont été plus difficiles à localiser :

▶ Chercheurs / EC : nous avons contacté l'ensemble des unités où se trouvaient des chercheurs relevant de la section 19 et leur avons transmis les mêmes requêtes qu'aux unités gérées par OA. Là non plus, les chercheurs recensés ne dépendent pas uniquement de la section 19.

▶ ITA / IATOS : nous avons effectué la même enquête qu'en OA auprès de l'ensemble des unités SDU. Bien que nous ne l'ayons pas fait dans cette première étape, il sera possible si on le juge nécessaire d'estimer les moyens disponibles pour la recherche en OA au prorata du ratio ITA-chercheurs de ces unités et de la vision précise que nous avons des moyens ITA-IATOS dans chacune d'elles.

▶ Nous n'avons pas d'information concernant les ITA-IATOS des unités hors SDU.

#### ■ Unités non gérées par la division OA et ne comptant pas de chercheurs de la section 19 :

Les chercheurs impliqués sont difficiles à recenser. Un examen rapide des programmes et en particulier du PNCA, montre que ces chercheurs relèvent de différents départements du CNRS (SPM, SPI, SDV, SC) et d'une dizaine d'organismes autres que le CNRS, avec une forte pluridisciplinarité (spectroscopie,

chimie théorique et analytique, techniques d'analyse etc.). Leur contribution a décliné sur la période récente (du fait de l'évolution des campagnes atmosphériques) et correspond à environ 40 « équivalents temps plein » (ETP). Bien que ce ne soit pas strictement exact, nous avons, en première approximation, assimilé l'activité de ces chercheurs à de la sous-traitance scientifique et technique de haut niveau, n'entrant pas dans le cadre de ce travail.

### ■ Unités prises en compte

Compte tenu de la création de la division SIC et des modifications intervenues pour certaines unités

depuis l'enquête effectuée pour la prospective de Brest, les contours des populations ont changé. Dans le tableau 1 nous présentons à gauche les unités affiliées à OA en 2000 et 2005 et à droite les autres unités, c'est-à-dire celles qui sont considérées comme ne relevant que partiellement de OA en 2000 ou 2005. Les différences observées montrent la difficulté qu'il y aura à comparer les chiffres de 2000 et ceux de 2005. Nous avons considéré que l'Ipev et la Division Technique de l'Insu mettaient des moyens à la disposition de l'ensemble de la communauté (pas uniquement OA) et nous ne les avons pas intégrés dans nos bilans.

Unités Communées à 2000 et 2005		Autres		IA / IATOS		Chercheurs/EC	
				2000	2005	2000	2005
GAME		ST					
LACE		LMCC		19	Per-équation	29	9
LND		SENESSE		20	Per-équation	25	14
SA		ORPC		8	Per-équation	18	
CETP		SOMA (S)		8	Per-équation	8	3
ELCO		CRPG		36		25	
EPCC		DL				1	
LISS		Anal.Bis			Per-équation		8
LISS2		DES			Per-équation		1
LSEET							
LOB (Néop)	LMSEM						
LMV	LOB	SIC					
	LPO	CESBIO		15		19	
LPCM		ATRE		16	Per-équation	32	3
LOREP	LOV	IDS			Per-équation		1
LOEPM	LOEAN						
LODYC	LEMAN	Hors EDU				11	8
	LA	EDU		6	Per-équation		
	LOBB	ESIT		1	Per-équation	12	4
	LOA	SEM		2	Per-équation	5	3
	CRIMA	SIFHE		7	Per-équation	7	
	CEPREM	ADM			Per-équation		
	LAMP	Labo Crn			Per-équation		
	USA				Per-équation		
				142		61	14

Plus pris en compte en 2005  
Plus pris en compte en 2000

Tableau 1

### ■ Bilan des effectifs pris en compte

L'enquête complète a porté sur un effectif total de personnels permanents de :

- ▶ 890 Chercheurs et EC, dont 90 localisés dans des unités non OA et 81 chercheurs qui n'ont pas répondu à l'enquête et que nous avons considéré comme ne relevant pas des disciplines OA.
- ▶ 857 ITA ou ITARF représentant l'ensemble des

personnels permanents des unités officiellement gérées par la division OA (ex-SDU). Il est en effet difficile et certainement arbitraire à terme de figer, dans une unité OA donnée, le travail d'un ITA entre ce qui relève ou ne relève pas de OA.

Les effectifs pris en compte dans l'exploitation de l'enquête sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2

		CNRS		Enseignement supérieur <sup>(1)</sup>		Autres organismes		CDD
		Ch	ITA	EC	IATOS	Ch	ITA	ITA
Unités OA	Section 19	229	424	188	234	134	199	150 <sup>(2)</sup>
	Autres sections	51		48		28		
	Non précisé			37		20		
Unités non OA	Section 19	29	<sup>(3)</sup>	22	<sup>(3)</sup>	2	<sup>(3)</sup>	<sup>(3)</sup>
	Autres	5		8		2		
	Non précisé			4				

(1) Y compris 18 CNAP

(2) Y compris 46 CDD « recherche spatial »

(3) Nous avons considéré que les moyens en personnels techniques dans les unités non OA pourraient au besoin être évalués au pro-rata des caractéristiques et du ratio ITA/chercheurs de ces unités. Toutefois, comme ils ne relèvent pas des recrutements OA, nous ne les avons pas pris en compte dans cette première étape.

# • La communauté scientifique

## Analyse

### ■ Effectifs globaux

La comparaison directe en termes d'effectifs globaux entre 2000 et 2005 est comme nous l'avons déjà signalé difficile. Si on se borne aux seules UMR communes, l'arrivée de nouvelles équipes où la façon de comptabiliser les chercheurs OA peut introduire des biais. Nous nous limiterons donc dans notre analyse à ce qui peut être tiré des statistiques de 2005.

### ■ Répartition globale des personnels en OA par organisme d'appartenance

Comme le montre la Fig.1, le CNRS et l'Université totalisent respectivement 45% et 33% des personnels. Les deux organismes ont un nombre très comparable de (~20% du total des personnels chacun), alors que la proportion d'ITA CNRS (25%) est proche du double de celle de l'Université (13%). Les proportions de chercheurs (11%) et d'ITA (11%) relevant des autres organismes sont équilibrées, Météo France et le CEA comptant le plus grands nombres de personnels toutes catégories confondues.

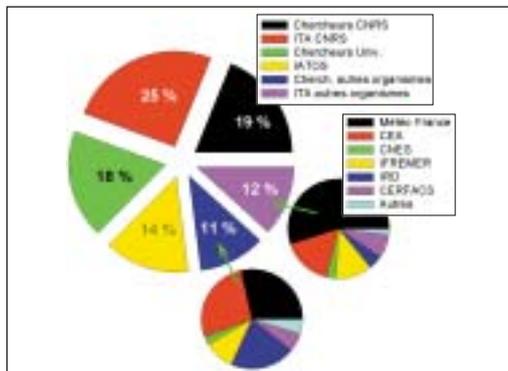


Fig.1 : Répartition globale des personnels par organisme d'appartenance en OA.

Le terme Université englobe les personnels rémunérés par les Universités, le MENRT et la CNAP.

■ À effectifs de chercheurs comparables, le ratio moyen ITA-chercheurs pour les Universités (0.7) est significativement inférieur à celui du CNRS (1.3). Il est également inférieur à celui des autres organismes (~1).

■ Dans la Fig.2, les chercheurs « non renseignés », localisés surtout au Service d'Aéronomie, au CETP et à l'IPSL, relèvent majoritairement de l'Astronomie-Astrophysique. Les chercheurs « isolés » appartiennent soit aux autres divisions des Sciences de l'Univers (Sciences de la Terre, Astronomie-Astrophysique, Surfaces et Interfaces Continentales) soit à d'autres départements tels que SPI, SDV ou encore SC. Les principales unités en terme d'effectif sont le LEGI (16 chercheurs), le CEREGE (15 chercheurs) et le laboratoire de Morphodynamique continentale et côtière (10 chercheurs). Tous les ITA-IATOS ont été pris en compte. Cette figure montre la part variable mais

significative, en particulier dans les unités relevant de l'IPSL, des CDD « recherche spatiale » et « non recherche spatiale », en lien avec non seulement le développement de projets instrumentaux, d'algorithmes et de bases de données, mais aussi avec le nombre de programmes européens.

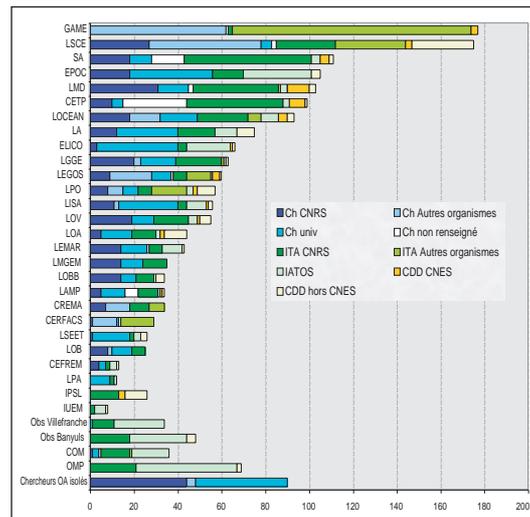


Fig.2 : Unités OA - Personnels OA par organisme d'appartenance.

### ■ Ratio ITA / Chercheurs

La Fig.3, représente, pour chaque unité, le nombre de chercheurs en fonction de celui d'ITA. Pour la plupart des unités, le ratio est nettement inférieur à 1, quel que soit l'effectif total. Les unités ayant un ratio supérieur à 1, le Game (URA), les UMS, et enfin le SA et le CETP ont un nombre important de chercheurs non OA. Pour ces deux unités, le ratio se rapproche de 1 lorsqu'on prend en compte l'ensemble des chercheurs (comme le montrent les flèches). Le résultat n'est pas significatif pour les UMS qui n'ont a priori pas vocation à accueillir de chercheurs.

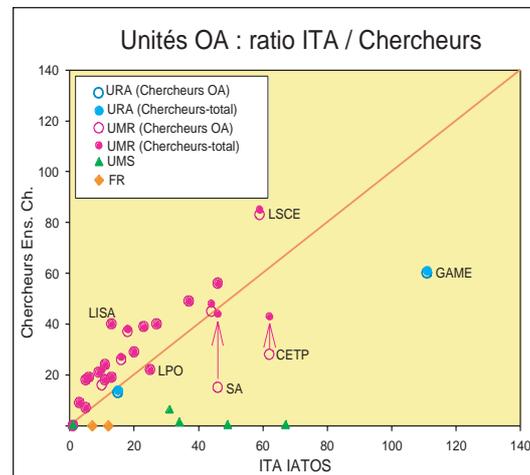


Fig.3 : Unités OA - Ratio ITA/chercheurs (tous organismes confondus).

### ■ Coûts salariaux

Dans le tableau 3-a nous présentons une estimation de la contribution de chaque organisme à la masse salariale des personnels OA, estimation faite en utilisant les catégories de personnels et les salaires moyens du tableau 3-b. On peut remarquer que tous organismes confondus, la masse salariale entre les

deux catégories de personnels est à peu près équivalente (46172k€ pour les chercheurs et 42341k€ pour les ITA) mais avec de fortes disparités suivant les organismes dues à la fois au nombre de personnels mais également à leur niveaux de qualification, disparités particulièrement marquées pour les personnels techniques.

Coûts salariaux annuels (kEuros)			
Organismes	Chercheurs	ITA	Total
CNRS	18246	21860	40106
EN-INP	16254	10140	26394
METEO-France	3430	5296	8726
CEA	2687	1641	4328
IRD	2135	480	2615
IFREMER	952	1050	2002
CERFACS	599	866	1465
CNAP-OSU	983	304	1287
CNES	354	306	660
DIVERS (MNHN, Collège de France, CNAM)	338	188	526
INSU	0	210	210
SHOM	198	0	198

**Tableau 3-a :** Coûts en personnels permanents par organisme.

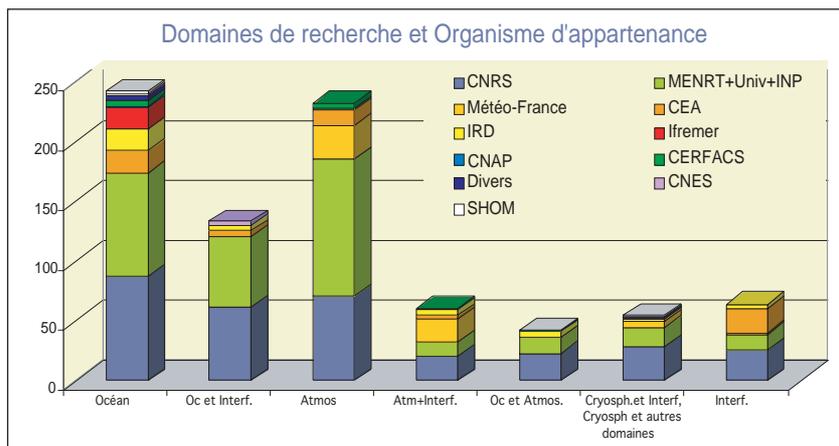
Calcul fait, sur la base des coût salariaux du tableau 5

Catégorie	DR, Pr, Phys	CR, MC, A PhysA, A	IR	IE	A/T	P-D	DEA
Coût salarial annuel moyen	77 000 €	46 000 €	66 000 €	52 000 €	43 000 €	37 000 €	24 000 €

**Tableau 3-b :** Coût annuel moyen de salaires, charges et frais généraux forfaitaires par catégorie de personnels CNRS et assimilés pour les contrats de recherche communautaires.

### ■ Effectifs Chercheurs

#### ■ Répartition par domaine de recherche et par organisme d'appartenance



**Fig.4 :** Répartition des chercheurs par domaine de recherche et par organisme.

Dans la Fig. 4, nous avons regroupé les domaines et sous domaines étudiés en sept catégories qui ne se recoupent pas :

- ▶ **Océan** (seule la rubrique « Océan » a été renseignée, les interfaces potentielles avec les surfaces continentales, la cryosphère ou l'atmosphère n'ont pas été mentionnées) ;
- ▶ **Océan et ses interfaces** (outre la rubrique « Océan », un ou plusieurs domaines de la rubrique « Interfaces » sont renseignés comme objet d'étude) ;
- ▶ **Atmosphère** (seule la rubrique « Atmosphère » a été renseignée) ;
- ▶ **Atmosphère et ses interfaces** (outre la rubrique

« Atmosphère » un ou plusieurs domaines de la rubrique « Interfaces » sont renseignés comme objet d'étude) ;

- ▶ **Océan et Atmosphère** (dans l'enquête, les deux rubriques principales « Océan » et « Atmosphère » ont été renseignées de façon équivalente, la rubrique « interfaces » pouvant également être mentionnée) ;
- ▶ **Cryosphère** (nous avons regroupé tous les cas où la rubrique « Cryosphère » était renseignée) ;
- ▶ **Interfaces multiples** (seule la rubrique « Interfaces » est renseignée, les chercheurs n'étudiant de façon spécifique ni l'océan, ni l'atmosphère, ni la cryosphère, mais les interactions entre ces trois domaines).

## • La communauté scientifique

■ Le nombre de chercheurs est majoritaire dans les rubriques « océan » et « atmosphère » par ailleurs comparables mais avec des disparités prévisibles entre organismes. Le nombre de chercheurs travaillant sur les deux objets d'études et également sur leur interface devient comparable toutes interfaces confondues.

■ La figure 5 montre que les différents organismes ne s'impliquent pas de la même façon dans les différents domaines de recherche : certains sont centrés sur le domaine océanique (Shom, Ifremer, Cnes), d'autres sur l'atmosphère (Météo France), les chercheurs du CNRS et de l'Université étant répartis de façon plus équilibrée. La majorité des chercheurs CNAP travaille sur l'atmosphère.

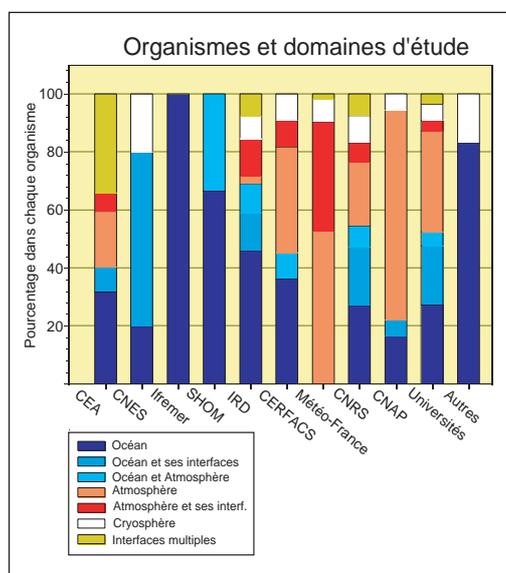


Fig. 5 : Domaines d'étude des différents organismes

### ■ Approche scientifique utilisée et propriétés étudiées

#### ► Océan

La proportion de chercheurs plutôt centrés sur les propriétés physiques et physico-chimiques de l'océan est très comparable à celle des chercheurs centrés sur ses propriétés biologiques de la colonne d'eau et/ou du pelagos-benthos. L'approche est fortement expérimentale (55%), et dans une moindre mesure couplée (27%). Moins de 20% des chercheurs font mention de l'utilisation de données satellites et ce sont essentiellement les théoriciens (40% pour ce dernier groupe), l'acquisition de données se faisant surtout par échantillonnage ou mesures *in situ*. Les chercheurs s'intéressent en majorité au Présent (>70%). L'échelle spatiale associe surtout la micro et la méso échelle. Il y a un peu de R&D (~13%) liée aux problèmes d'échantillonnage et surtout sans doute de mesures *in situ*. Les mots-clés les plus cités sont : processus (73%), cycles (42%) et climat (37%)

#### ► Océan et ses interfaces (continent, atmosphère, cryosphère)

Le schéma général est le même que pour l'océan seul. Dans l'acquisition des données, la part de l'échantillonnage est toujours forte, le rôle des mesures *in situ* et de l'utilisation des données satellites variant peu. Les échelles de temps et d'espace ne changent pas. Les mots-clés les plus cités sont : processus (86%) et cycles (43%). La mention d'anthropique augmente (47%) et celle de climat est stable (40%).

#### ► Océan et atmosphère

Les études portent sur les propriétés physiques de l'océan ainsi que sur les propriétés radiatives, dynamiques hydrologiques et chimiques de la couche de mélange et de la troposphère moyenne. Les approches théoriques (30%) et couplées (47%) deviennent prépondérantes. L'acquisition de données *in situ* et l'utilisation de données satellites (65% le mentionnent) dominant. L'échelle de temps est uniquement le présent, l'échelle d'espace change peu (globale seule <10%). La part de R&D augmente légèrement (20%) incluant les développements de codes. Les mots-clés dominants : sont processus (63%) et climat (50%).

#### ► Atmosphère

Les recherches portent principalement sur la couche limite et la troposphère (70%) et dans une moindre mesure sur l'UTLS (Upper Troposphere lower Stratosphere) et la stratosphère (25%). Elles concernent autant les propriétés physiques (radiatives, dynamiques et hydrologiques) que chimiques de l'atmosphère. La part de l'expérimental diminue (38%) au bénéfice de la modélisation (60%). L'utilisation des données satellite augmente (30%), ainsi que l'utilisation de mesures *in situ* (62%). La période étudiée est uniquement le présent. L'échelle spatiale associe surtout la micro et la méso échelle (globale seule <20%). La part de R&D augmente encore (24%). Les mots clé dominants sont : processus (54%) et climat (50%).

#### ► Atmosphère et ses interfaces

Les recherches concernent les propriétés physiques (84%) de la couche limite et de la troposphère (80%). L'approche est majoritairement théorique (46%) et couplée (43%). L'utilisation de données satellites (32%) et de mesures *in situ* (50%) sont importantes. L'échelle de temps est majoritairement le présent (95%), l'échelle spatiale varie peu (globale seule <10%). La part de R&D est importante (43%), en particulier chez les théoriciens (codes et algorithmes). Dans les mots clés, la notion de climat devient prépondérante (87%), processus restant souvent mentionné (50%).

#### ► Cryosphère

Ce sont surtout les propriétés physiques de la cryosphère qui sont étudiées. L'approche couplée domine (53%) mais la part de l'expérimental redevient

significative (26%). Les données sont acquises surtout par échantillonnage (42%) et mesure in situ (26%), l'utilisation des données satellites diminuant (26%). Pour la première fois, une part importante des études concerne les périodes passées (51%). La part de R&D est limitée (14%). Dans les mots-clés, climat (58%) et processus (50%) dominant.

► **Interfaces multiples (océan-continent-atmosphère-cryosphère)**  
Les recherches portent surtout sur les propriétés physiques des interfaces. L'approche est très expérimentale (45%), 60% des données sont acquises par échantillonnage et mesures *in situ*. 50% des chercheurs s'intéressent au présent, 50% au passé. La part des études à l'échelle globale augmente (26%). Il est peu fait mention de R&D (10%). Les mots-clés cités sont : climat (62%), puis processus-cycles-anthropiques (~20%).

■ D'une façon générale, seulement 160 chercheurs, essentiellement localisés en « Océan et ses interfaces », « Cryosphères » et « Interfaces multiples » travaillent sur les paléo environnements. Ce sont le Cnes, l'IRD et le Cerfacs qui ont la plus grande proportion de chercheurs utilisant les données satellite (100, 64 et 55% respectivement).

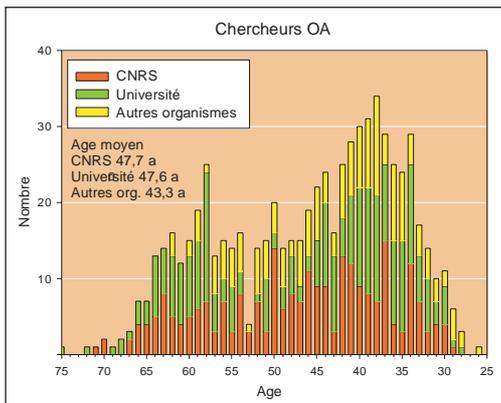


Fig. 6 : Distribution en âge des chercheurs OA

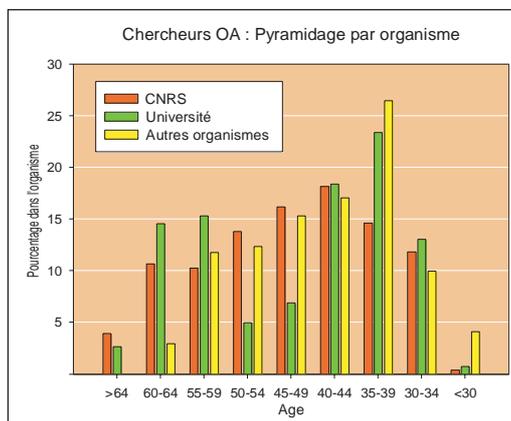


Fig. 7 : Pyramidage par organisme d'appartenance

#### ■ Démographie (âges calculés pour 2005)

La distribution en âge des chercheurs (Fig. 6) montre deux pics, le plus petit centré autour de 60 ans, le plus élevé autour de 40 ans. L'âge moyen des chercheurs au CNRS et

à l'Université est supérieur de plus de 4 ans à l'âge moyen calculé pour les organismes partenaires. Le pyramidage des âges par organisme (Fig. 7) montre une certaine stabilité dans les recrutements CNRS, un minimum dans la tranche 45-55 ans pour l'université et une importance relative des recrutements récents pour les autres organismes.

■ Sur la Fig.8, nous présentons la répartition des chercheurs par années de naissance dans les grands domaines de recherche définis précédemment.

► **Océan (230 Ch.)** : 35% des chercheurs (20% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 26% (32% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 14% (18% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Océan et ses interfaces (133 Ch.)** : 29% des chercheurs (20% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 23% (29% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 14% (19% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Océan et Atmosphère (43 Ch.)** : 54% des chercheurs (22% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 23% (26% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 16% (22% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Atmosphère (222 Ch.)** : 42% des chercheurs (44% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 25% (13% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 12% (9% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Atmosphère et ses interfaces (61 Ch.)** : 25% des chercheurs (24% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 15% (19% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 5% (9% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Cryosphère (55 Ch.)** : 38% des chercheurs (24% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 29% (17% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 15% (17% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

► **Interfaces multiples (22 Ch.)** : 40% des chercheurs (36% des chercheurs CNRS) ont moins de 40 ans, 19% (18% au CNRS) ont 55 ans ou plus, et 13% (18% au CNRS) ont 60 ans ou plus.

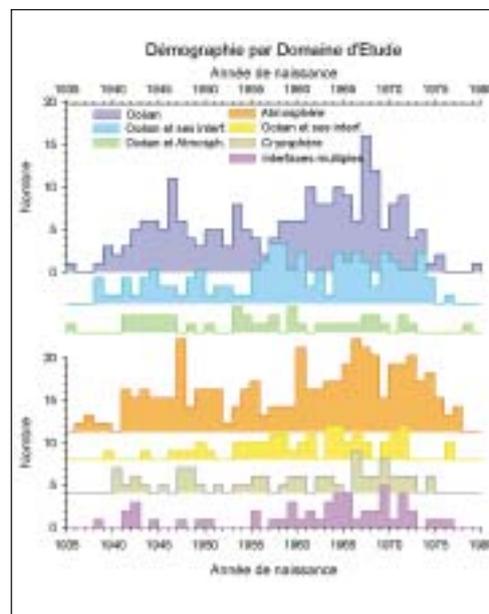


Fig. 8 Répartition par âge et par domaine d'étude

## • La communauté scientifique

Cette statistique porte sur un petit nombre de chercheurs, mais il est intéressant de noter que :

- ▶ L'ensemble des domaines a bénéficié d'un certain rajeunissement au cours des 10 dernières années ;
- ▶ Ce rajeunissement est plus sensible dans les organismes autres que le CNRS ;
- ▶ La répartition est globalement plus favorable pour les sciences de l'atmosphère.

■ À l'horizon 2015, les différents domaines de recherche auront perdu en moyenne 24% de leurs effectifs, le domaine le plus pénalisé étant « Océan et Atmosphère » avec 34% de perte ; les expérimentateurs seront les plus touchés, avec en moyenne 36% de perte, ces pertes étant les plus fortes dans les sciences de l'atmosphère (~40%) et de la cryosphère (~60%).

### Effectifs ITA et IATOS

#### ■ Répartition par grade et par organisme d'appartenance

La répartition des 857 agents permanents entre les différents grades, tous organismes confondus, est relativement homogène, avec ~ 17% d'IR, 26% d'IE, 11% d'AI, 28% de techniciens et 21% d'ADT, AJA. Toutefois, comme le montre la Fig.9, les différents organismes ne recrutent pas au même niveau et/ou n'offrent pas les mêmes possibilités de progression de carrière. La différence la plus marquée, qui explique en partie les écarts observés pour les coûts salariaux, concerne l'Université : alors que le CNRS et les autres organismes comptent une majorité d'ingénieurs et d'assistants ingénieurs, les personnels IATOS sont essentiellement des techniciens, les bas niveaux de recrutement étant aggravés par des possibilités de promotion extrêmement réduites. En ce qui concerne les CDD non « recherche spatiale », il y avait au moment de cette enquête 65% d'IE-IR et 35% d'AI-T.

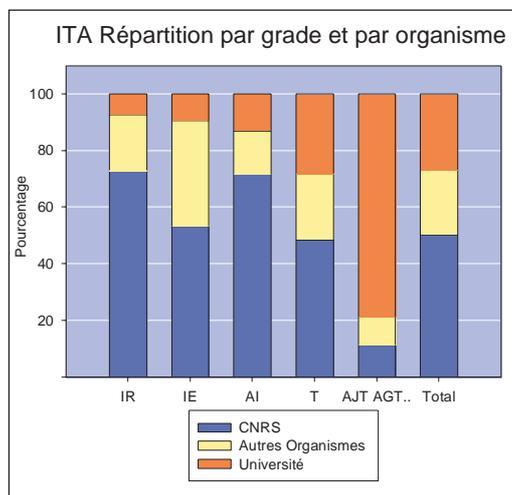


Fig.9 : Répartition des personnels par grade et par organisme d'appartenance

#### ■ Répartition par branche d'activité professionnelle (BAP) et par famille de métiers

La figure 10 présente la population ITA de référence (juin 2005), tous organismes confondus.

Le personnel se répartit inégalement dans les différentes BAP :

- ▶ BAP E, Informatique et calcul scientifique : 29 %
- ▶ BAP C, Sciences de l'Ingénieur et l'Instrumentation Scientifique : 22 %
- ▶ BAP H, Gestion scientifique et technique : 17 %
- ▶ BAP G, Patrimoine, logistique, prévention : 13 %
- ▶ BAP A, Sciences du vivant : 11 %
- ▶ BAP B, Sciences chimiques et sciences des matériaux : 4 %
- ▶ BAP F, Documentation : 4%.

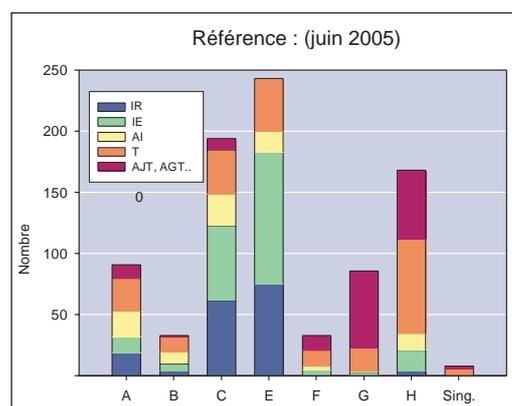


Fig. 10 : ITA Population de référence

■ On observe un fort déséquilibre des grades suivant les BAP, avec un pourcentage élevé d'ingénieurs en BAP C et E, et une majorité de petits grades en BAP G (personnels des UMS en particulier) et H.

■ La Fig.11 montre la répartition des personnels par famille de métiers, pour les BAP A, B, C et E. L'observation et la caractérisation des systèmes naturels représentent l'activité principale en BAP A. En BAP B, les effectifs des unités OA se situent beaucoup plus en analyse chimique qu'en sciences des matériaux.

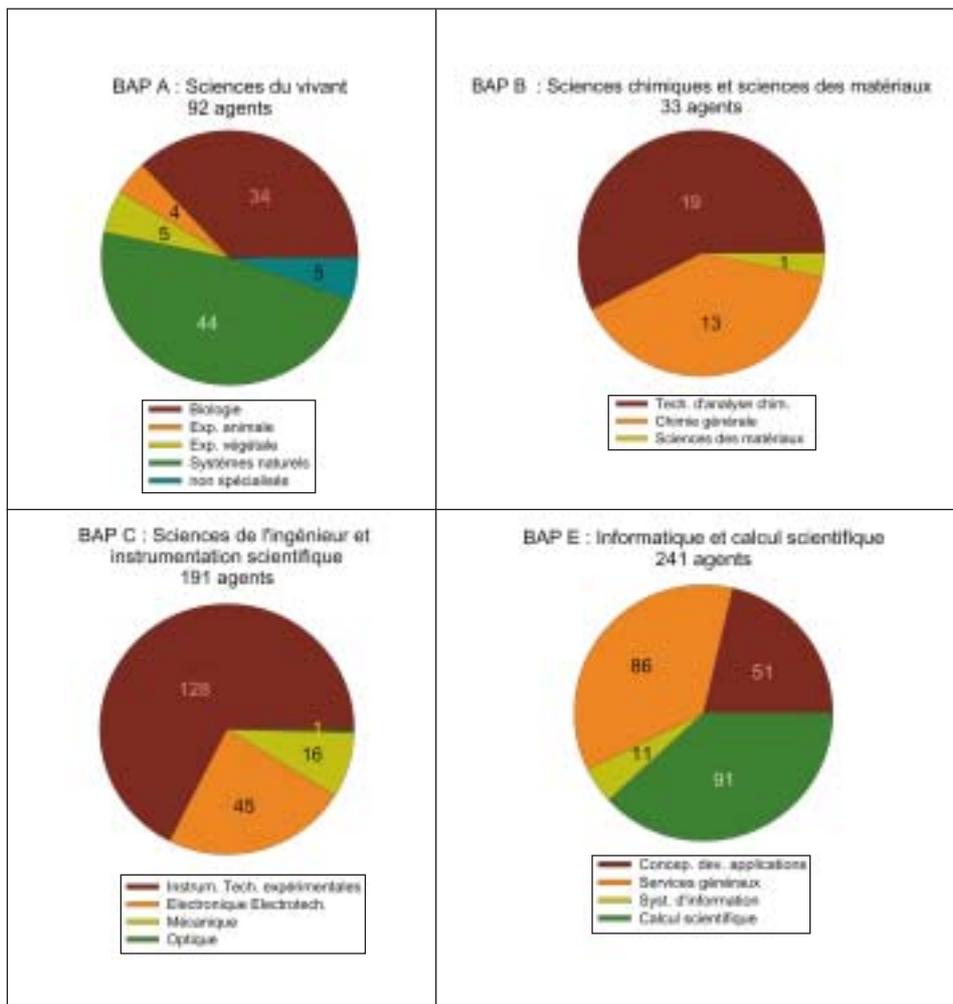


Fig. 11 : Répartition par familles de métiers en OA – BAP A, B, C et E

■ En BAP C, la part de la conception instrumentale et du développement de techniques expérimentales est très largement supérieure à celle de métiers plus spécifiques comme l'électronique ou la mécanique, sans doute du fait de la part croissante des projets expérimentaux intégrés complexes. En informatique, il faut noter la part importante du développement (pour les mêmes raisons qu'en BAP C) et du calcul scientifique. Dans ces deux BAP, la proportion d'ingénieurs est significativement plus élevée (~60%) que dans les deux autres BAP (~30%).

Le besoin croissant de personnels qualifiés se traduit dans le recrutement des CDD : les CDD « recherche spatiale » sont essentiellement des ingénieurs (calcul scientifique et développement instrumental surtout) de même que les CDD non « recherche spatiale » (50% en BAP E, dont les 2/3 d'ingénieurs en calcul scientifique et dans une moindre mesure en développement de base de données, 11% en BAP A, 9% en BAP C dont les trois quarts d'ingénieurs).

#### ■ Projection de départs en retraite par organisme d'appartenance

Les Fig.12 et 13 sont à comparer aux Fig. 5 et 6 (chercheurs) et font apparaître le vieillissement marqué des personnels ITA CNRS et universitaires par

rapport à ceux des autres organismes. En considérant que l'âge de la retraite allait se rapprocher de 65 ans, nous avons fait une estimation des départs prévisibles à 5 (avant le 1<sup>er</sup> janvier 2010) et 10 ans (avant le 1<sup>er</sup> janvier 2015, Fig. 14 et 15). Ces chiffres sont des minimums, car fondés sur un départ à la retraite repoussé au maximum. D'ici 2010, il y aura au moins 48 départs dont 23 IR et 18 IE. On en prévoit au moins 194 d'ici 2015. Les figures 14 et 15 sont à mettre en regard des effectifs de référence (Fig. 10). En 2015, les catégories les plus touchées seront les ingénieurs (IR, IE) et les techniciens. On prévoit un minimum de 57, 50 et 47% de départs en parmi les IR des BAP A, B et C, respectivement. Sur la même période, 45% et 35% des IE des BAP A et C seront également partis. Ces personnels relèvent surtout du CNRS. L'érosion des personnels les plus qualifiés en BAP A et C est alarmante pour des disciplines où l'observation et le développement instrumental sont fondamentaux. Par ailleurs, même si la diminution prévisible des effectifs en BAP E est moins marquée, elle est très préoccupante au vu de l'importance croissante de tous les domaines de l'informatique en OA. Enfin, les départs importants de techniciens prévus en BAP G et H pénaliseront le fonctionnement des unités.

## • La communauté scientifique

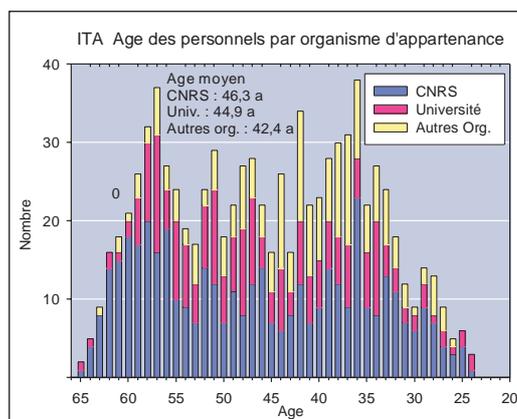


Fig.12 Age des personnels par organismes d'appartenance

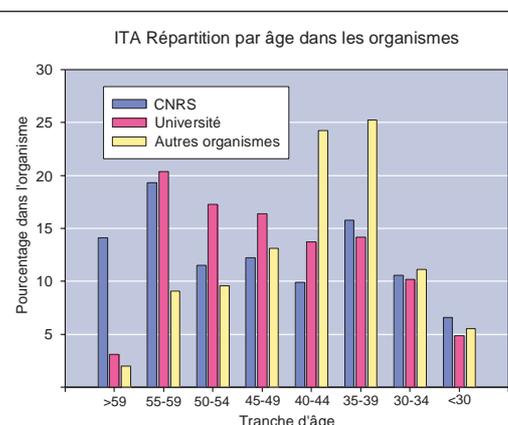


Fig.13 Pyramide d'âge par organismes d'appartenance

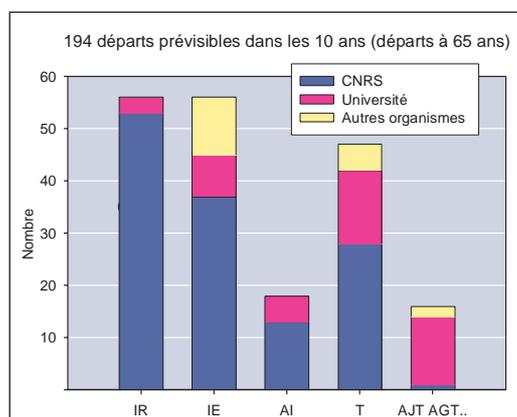


Fig. 14 Nombre de départs par organisme avant 2015

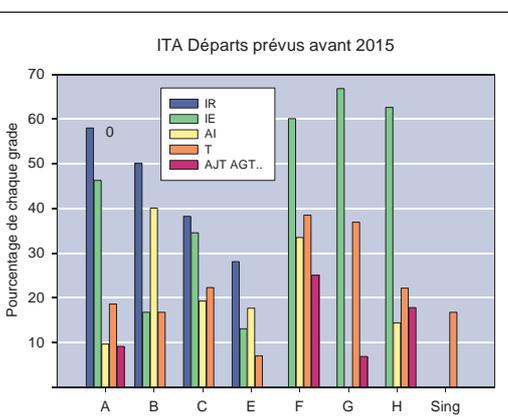


Fig. 15 Départs prévus avant 2015 par BAP et grade

### ■ Besoins affichés par les unités

Année	A		B		C		E		F		G		H	
	IE-IR	AI-T												
2002	0	3	2	0	7	4	0	0	3	0	1			5
2003	5	6	2	4	10	4	8	3	0	1	2	1	2	10
2004	6	5	1	2	13	6	8	0	3	1	3	1	3	1
2005	3	4	3	3	10	5	7	5	1	0	5	1	1	2

Tableau 5 : Evolution des besoins exprimés par les unités (1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> priorités) et recrutements

Au cours des cinq dernières années, les BAP les plus touchées par les départs ont été la BAP C (31% des départs dont les trois quarts d'ingénieurs) et la BAP E (29% des départs, très majoritairement des ingénieurs dont les deux tiers en calcul scientifique). Compte tenu de ces départs et de l'évolution des projets en OA les unités ont affiché des besoins croissants dans ces deux BAP (Tableau 5). On peut toutefois s'interroger sur la proportion des besoins exprimés en Ingénieur de recherche par rapport à ceux qui sont exprimés en Ingénieurs d'étude, qui traduit peut-être une surqualification de certains profils par rapport aux besoins réels des unités.

## Conclusion

Cette enquête est très détaillée et la base de données constituée permet de sortir une multitude d'informations sur les personnels, les métiers, les méthodes utilisées, les objets d'études, etc, et dont les figures présentées dans ce chapitre ne sont qu'un exemple. Elle permet d'avoir une vision de l'évolution des personnels « chercheurs » et « ITA » en distinguant les niveaux de qualification et les domaines d'expertise. Elle devrait faciliter la mise en adéquation des recrutements nécessaires dans les années qui viennent avec les priorités scientifiques affichées. Cependant, cette base de données n'a d'intérêt à terme que si elle est archivée et régulièrement actualisée.

## ■ Annexe

Les rubriques et sous rubriques de l'enquête envoyée aux chercheurs et enseignants-chercheurs étaient :

- ▶ **Le domaine d'étude**, c'est-à-dire le domaine dont le chercheur vise à reconstruire certaines caractéristiques
  - Océan (**Côtier**, **Hauturier**, **Benthique**, **Pélagique**)
  - Atmosphère (**Couche Limite**, **Troposphère**, **UTLS**, **Stratosphère**)
  - **Cryosphère**
  - Interfaces (**Océan**, **Atmosphère**, **Continent**, **Cryosphère**, le chercheur coche les cases à l'interface desquelles il se situe)
- ▶ **Les propriétés étudiées**
  - Océan : **Physiques**, **Chimiques**, **Biologiques**
  - Atmosphère : **Dynamiques**, **Radiatives**, **Hydrologiques**, **Chimiques**
  - Cryosphère : **Rhéologique** (au sens mécanique, dynamique etc...), **Radiatives**, **Hydrologiques**,
  - **Chimiques** interfaces : transferts **Physiques**, **Chimiques**
- ▶ **L'approche utilisée**
  - **Expérimentale** dominant
  - **Théorique** et/ou modélisation dominant
  - **Couplée**
- ▶ **La façon d'acquérir les données**
  - Données **satellites**
  - **Simulation** (chambres, labo, réacteurs etc.)
  - Mesures *in situ*
  - Travail sur **échantillons**
- ▶ **L'échelle de temps couverte**
  - **Présent**
  - **Paléo** (tout ce qui est reconstitutions passées)
- ▶ **L'échelle spatiale de travail**
  - **Micro** échelle
  - **Méso** échelle
  - Grande échelle ou échelle **globale**
- ▶ **L'implication en recherche et développement R&D** (instrumentation, codes) : dans quelle mesure un chercheur contribue-t-il de façon importante à développer des instruments ou des outils théoriques (codes, modèles) originaux utilisables dans le reste de la communauté
- ▶ **Certains mots clés** : **climat**, étude de **processus**, **cycles** biogéochimiques, **anthropisation**, systèmes **extra-terrestres**.

## L'insertion de la communauté océan-atmosphère dans les universités

**L** Le domaine océan-atmosphère est un domaine de recherche relativement nouveau (quelques décennies) et son implantation dans les universités reste très hétérogène. Il faut rappeler que la presque totalité de nos laboratoires sont des unités mixtes avec les universités (UMR), que la préparation des doctorats, essentiels pour la vie de nos laboratoires, se fait à travers les Ecoles doctorales des Universités et que la plupart des candidats aux postes de chercheur sont issus des universités. Il est difficile de présenter une étude exhaustive de l'implication universitaire et donc de dresser un état des lieux de notre capacité de formation, élément indispensable au renouvellement des personnels qui seront nombreux à prendre leur retraite dans les prochaines années, mais cette implication peut se mesurer à travers trois points :

▶ **Le dispositif universitaire** (carte géographique ; nombre d'enseignants-chercheurs, leur répartition, etc.) ;

- ▶ **La contribution de nos disciplines à l'offre de formation** des universités en se concentrant sur l'offre au niveau master ;
- ▶ **La formation doctorale.**

### ■ Le dispositif universitaire

Les laboratoires de la division océan-atmosphère sont répartis actuellement sur 14 villes universitaires (en comptant la région parisienne comme 1 seul site). Les 25 laboratoires se répartissent de la façon suivante :

- ▶ Banyuls (Paris 6), 1 laboratoire ;
- ▶ Bordeaux, 1 laboratoire ;
- ▶ Brest, 2 laboratoires ;
- ▶ Clermont-Ferrand, 1 laboratoire ;
- ▶ La Rochelle, 1 laboratoire ;
- ▶ Lille, 1 laboratoire ;
- ▶ Grenoble, 1 laboratoire + 1 équipe ;

## • La communauté scientifique

- ▶ Marseille, 2 laboratoires ;
- ▶ Paris/IDF, 7 laboratoires ;
- ▶ Perpignan, 1 laboratoire ;
- ▶ Toulon, 1 laboratoire ;
- ▶ Toulouse, 4 laboratoires ;
- ▶ Villefranche-sur-mer (Paris 6), 1 laboratoire ;
- ▶ Wimereux, 1 laboratoire.

■ Le nombre d'enseignant-chercheurs (professeurs et maîtres de conférences) dans nos laboratoires est actuellement, approximativement de 270<sup>3</sup>, auxquels il faut ajouter 25 personnels du CNAP (physiciens et physiciens adjoints) étiquetés OA, dont 18 sont affectés à des Services d'Observation. Ce personnel universitaire n'est pas rattaché à une seule section du CNU. La section 37 rassemble la presque totalité des atmosphériciens et des océanographes physiciens.

### Contribution à l'offre de formation master

Le nouveau dispositif Licence, Master, Doctorat (LMD) a été mis en place progressivement dans les universités françaises à partir de 2003. La nouvelle offre de formation en masters (enseignement sur 2 ans, après les 3 ans de licence) a été souvent une

opportunité pour nos disciplines, en général attractives, pour occuper un nouvel espace dans l'offre universitaire de formation. D'un autre côté, même si les laboratoires continuent à accueillir des stagiaires de la 2<sup>ème</sup> année du master (ex-DEA), il existe une plus forte coupure entre la formation master et la formation doctorale. Ce sont les Ecoles doctorales qui se trouvent au centre du dispositif doctoral.

■ L'implication de nos disciplines dans la formation en master est extrêmement diverse d'une université à l'autre. Suivant le poids des laboratoires et aussi l'historique, on trouve certaines universités avec des masters très bien adaptés à la formation souhaitée pour nos disciplines, tandis que dans d'autres, les formations sont soit pluridisciplinaires, soit plus généralistes. Le tableau suivant présente l'ensemble des masters dispensés dans les 14 sites universitaires abritant nos laboratoires. Ce sont en tout 17 mentions et 28 spécialités qui sont proposées. Dans presque tous les cas, la spécialité correspond clairement à une formation sur les milieux atmosphérique ou océanique. Par contre, le nom de la mention du master n'est pas toujours spécifique à notre domaine. C'est le cas en particulier pour Clermont-Ferrand (physique), La Rochelle (sciences de la Terre), Orléans (énergétique et environnement). Il est intéressant aussi de remarquer que sur les 17 mentions, 11 portent le mot environnement dans leur titre.

Site	Domaine	Mentions	Spécialités	Recherche (R) ou Professionnel (P)
Paris 6 ENS Ec.Polytech.	Sciences et Technologie.	Sciences de l'Univers, environnement, écologie	Océan, atmosphère, climat et télédétection.	R, P
			Océan, atmosphère, climat et télédétection.	R, P
Paris 7	Sciences, santé, applications	Sciences et génie de l'environnement	Contamination, aérosols et bioaérosols. Atmosphères et qualité de l'air	P RP
UVSQ	Sciences de L'environnement, du territoire et de l'économie	Sciences de L'environnement	Interaction climat, environnement et télédétection.	R
			Qualité de l'air et lutte contre le bruit	P
Bordeaux	Sciences et Technologie.	Sciences de la Terre, de l'océan, de l'aménagement et de l'environnement	Environnements océanographiques	R

<sup>3</sup> Les chiffres sont légèrement différents de ceux du chapitre précédent, la liste des laboratoires concernés n'étant pas strictement identique.

Brest	Sciences de la Mer et du littoral	Sciences Biologiques marines.	Sciences Biologiques marines.	R
		Sc. Chimiques de l'environnement Marin.	Sc. Chimiques de l'environnement Marin.	R
		Géosciences océan.	Géosciences océan.	R
		Physique et mécanique des milieux continus	Géophysique marine	R
			Physique océan-atmosphère	R
Clermont	Sciences et technologies.	Physique	Physico-chimie de l'atmosphère et du climat	R
La Rochelle	Environnement et espaces littoraux	Sciences de la terre	Géomatériaux et eaux (cohab. Poitiers)	R
Lille	Sciences et Technologies.	Sciences de la matière	Optique, molécules, réactivité	R
		Environnement.	Biodiversité, paléontologie, océano biologique	R
			Milieux naturels et antropisés	R
Univ. Littoral	Sciences et Technologies.	Environnement	Qualité de l'air et environnement industriel	R
Grenoble	Sciences, Technologies.	Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'environnement	Océan, atmosphère, hydrologie	R
Marseille	Sciences	Océanographie	Océano Physique et météo côtière	R
			Océano et biogéochimie	R
			Biologie et écologie marine	R
			Economie et environnement	R
Orléans	Sciences et Technologies	Energétique et environnement	Chimie de la combustion et de l'atmosphère	R
Perpignan	Sciences et Technologies.	Environnements méditerranéens et développement durable	Environnements méditerranéens	R, P
Toulon	Sciences et Technologies	Sciences de la mer, environnement, systèmes	Chimie analytique, réactionnelle et modélisation en environnement.	R
			Mesures, instrumentation, surveillance du sol, atmosphère, océan	P
Toulouse 3 ENM	Sciences de l'Univers	Sciences de l'Atmosphère et océanographie	Océan, atmosphère et surfaces continentales.	R
			Techniques spatiales et instrumentation	P

## • La communauté scientifique

### ■ Écoles doctorales du domaine océan-atmosphère (OA)

Les 25 laboratoires de la division océan-atmosphère sont rattachés à 13 écoles doctorales (voir tableau ci-dessous). Seul 4 de ces écoles doctorales

(Ile-de-France, Brest, Grenoble et Toulouse) sont uniquement SDU, les autres étant pluridisciplinaires. Ces écoles doctorales d'étiquette SDU correspondent à des sites où les laboratoires OA ou SDU sont bien implantés.

Site	Laboratoires	École Doctorale	Observations
Paris	1572, 7159, 7853, 7620, 8105, 8539, 8639	Sciences de l'environnement Matériaux, Milieux...	SDU Pluridisciplinaire
Bordeaux	5805	Sciences du vivant, Géosciences, Environnement	Pluridisciplinaire
Brest	6523, 6539	Sciences de la mer	SDU+Pluridisc.
Clermont	6016	Sciences fondamentales	Pluridisciplinaire
La Rochelle	10		
Lille	8518	Sc. Matière, Rayonnement, Environnement	Pluridisciplinaire
Univ. Littoral	8013		
Grenoble	5183 ; Équipe LEGI	Terre, Univers, Environnement	SDU
Marseille	6117, 6535	Sciences de l'environnement	Pluridisciplinaire
Orléans			
Perpignan	5110	Biologie, Environn. Et sc. Pour l'ingénieur	Pluridisciplinaire
Toulon	6017	ED Univ. Toulon	Pluridisciplinaire
Toulouse	5560, 5566, 1357, 1875	Sc. Univers, Espace et environnement	SDU

Calipso

Esa

Giec

Acronymes

LEFE

IGBP

SDLA

Meso-NH

OHM-CV

PCR DT

WORP

## • Acronymes

<b>Accent</b>	Atmospheric composition change : the european network of excellence
<b>ACI</b>	Action concertée incitative
<b>ADCP</b>	Courantomètre acoustique profileur
<b>Ademe</b>	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
<b>ADM_Aeolus</b>	Atmospheric dynamics mission aeolus
<b>AIMES</b>	Analysis, integration and modeling of the earth system
<b>AMIP</b>	Atmospheric model intercomparison model
<b>Amma</b>	Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine
<b>AO</b>	Appel d'offre
<b>API</b>	Action programmée interorganismes
<b>Apple</b>	Adaptation of photosynthesis : paramétrisation from laboratory experiments
<b>Argo</b>	Profileur température salinité
<b>Arome</b>	Applications de la recherche à l'opérationnel à mésoéchelle
<b>Arpege</b>	Modèle global de prévision numérique opérationnel de Météo France
<b>ART</b>	Actions de recherches thématiques
<b>Asset</b>	Assimilation of Envisat data
<b>Assim</b>	Programme assimilation de données de LEFE
<b>Asterx</b>	AUV pour la surveillance sous-marine en domaine côtier
<b>AUV</b>	Autonomous underwater vehicle
<b>BAP</b>	Branche d'activité professionnelle
<b>Beam</b>	Bio-physico-chimie de l'eau atmosphérique et modifications anthropiques
<b>Bilbo-Flostral</b>	Rôle des régions australes dans le système climatique – flotteurs de l'océan austral
<b>Biopollatm</b>	Biosphère et pollution atmosphérique en zone rurale et périurbaine
<b>Biosope</b>	Biogeochemistry and optics south pacific experiment
<b>BPCL</b>	Ballon pressurisé couche limite
<b>BRGM</b>	Bureau de recherches géologiques et minières
<b>C4mip</b>	Coupled carbon cycle climate model intercomparison project
<b>Calipso</b>	Cloud aerosol lidar infrared pathfinder satellite observation
<b>Caraus</b>	Carbone austral
<b>Carioca</b>	Carbone interface ocean atmopshere
<b>Catch</b>	Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique
<b>CCRT</b>	Centre de calcul recherche et technologie
<b>CDD</b>	Contrat à durée déterminée
<b>CDTI</b>	Centre pour le développement technologique industriel
<b>CEA</b>	Commissariat à l'énergie atomique
<b>Cerfacs</b>	Centre européen de recherche et de formation avancée
<b>CESOA</b>	Etude du cycle du soufre en relation avec le climat aux moyennes et hautes latitudes sud
<b>CETP</b>	Centre d'étude des environnements terrestres et planétaires
<b>Champ</b>	Challenging minisatellite payload (for geoscientific and atmospheric research)
<b>Chat</b>	Chimie atmosphérique
<b>Ciber</b>	Cycles biogéochimiques, environnement et ressources
<b>Cines</b>	Centre informatique national de l'enseignement supérieur
<b>Cir</b>	Comité inter régional
<b>Cirene</b>	Centre d'initiative et de recherche dans le domaine de l'énergie et de l'environnement
<b>CLA</b>	Couche limite atmosphérique
<b>Clipper</b>	Projet pour la modélisation à haute résolution de la circulation de l'océan Atlantique
<b>Clivar</b>	Climate variability and predictability
<b>Cloudsat</b>	Cloud satellite
<b>CMIP</b>	Coupled model intercomparison project
<b>Cnap</b>	Conseil national des astronomes et physiciens
<b>Cnes</b>	Centre national d'études spatiales
<b>CNFCG</b>	Comité national français sur les changements globaux
<b>CNFRA</b>	Comité national français pour les recherches Antarctiques
<b>CNFRO</b>	Comité national français de la recherche océanographique
<b>CNRM</b>	Centre national de recherche météorologiques
<b>CNRS</b>	Centre national de la recherche scientifique
<b>Cofusi</b>	Comité national français des unions scientifiques internationales
<b>CONAE</b>	Comision nacional de actividades espaciales (Argentine)
<b>Concordia</b>	Station antarctique au site Dôme C

<b>Copes</b>	Coordinated observation and prediction of the earth system
<b>CPI</b>	Cloud particle imager
<b>CPU</b>	Conférence des présidents d'université
<b>CSIC</b>	Commission spécialisée surfaces et interfaces continentales de l'Insu
<b>CSOA</b>	Commission spécialisée océan atmosphère de l'Insu
<b>CTD</b>	Sonde pour la mesure de la profondeur, température, salinité
<b>CTOH</b>	Centre de topographie des océans et de l'hydrosphère
<b>CVI</b>	Counterflow virtual impactor
<b>Demeter</b>	Development of a european multimodel ensemble system for seasonal to interannual prediction
<b>Doris</b>	Determination d'orbite et de radiopositionnement intégrés par satellite
<b>Drakkar</b>	Projet d'étude de la circulation en mer du nord et Atlantique nord
<b>Drake</b>	Campagne océanographique dans le détroit Drake (océan austral)
<b>DT</b>	Division technique de l'Insu
<b>Dyamed</b>	Dynamique des flux en Méditerranée
<b>Earthcare</b>	Projet de l'agence spatiale européenne
<b>EC2CO</b>	Ecosphère continentale et côtière
<b>Ecco</b>	Ecosphère continentale : processus et modélisation
<b>Eclipse</b>	Environnement et climat du passé ; histoire et évolution
<b>ECMWF</b>	European center for medium-range weather forecasts
<b>Edf</b>	Electricité de France
<b>Egee</b>	Etude de la circulation océanique dans le Golfe de Guinée
<b>Eloise</b>	European land-ocean interaction studies
<b>Ensembles</b>	Programme de recherches sur le climat du 6 <sup>ème</sup> PCRD
<b>Enso</b>	El niño southern oscillation
<b>Envisat</b>	Environmental satellite
<b>Epica</b>	European project for ice coring in Antarctica
<b>Eranet</b>	European research area-network
<b>ERC</b>	European research council
<b>ERS</b>	European remote sensing satellite
<b>ESA</b>	European space agency
<b>Easoe</b>	European arctic stratospheric ozone experiment
<b>Escompte</b>	Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d'émissions
<b>ESF</b>	European science foundation
<b>Esfri</b>	European strategy forum on research infrastructures
<b>ESSP</b>	Earth system science partnership
<b>Ether</b>	Centre de produits et de services de chimie de l'atmosphère
<b>Eufar</b>	European fleet for airborne research
<b>Eurocean</b>	Centre européen pour les sciences et la technologie marines
<b>Euroclimate</b>	Climate variability and the (past, present, future) carbon cycle
<b>Euryi</b>	European young investigator awards
<b>Eve</b>	Evolution et variabilité du climat à l'échelle globale
<b>Fatex</b>	Front and atlantic storm-track experiment
<b>Flostral</b>	Flotteurs de l'océan Austral
<b>Game</b>	Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique
<b>GCM</b>	Global climate model
<b>GCSS</b>	Gewex cloud system study
<b>GEMS</b>	Global earth monitoring system
<b>Geo</b>	Global on earth observations
<b>Geohab</b>	Global ecology and oceanography of harmful algal bloom,
<b>Geotrope</b>	Geostationary tropospheric pollution explorer
<b>GES</b>	Gaz à effet de serre
<b>Gewex</b>	Global energy and water experiment
<b>GICC</b>	Gestion et impacts du changement climatique
<b>Giec</b>	Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement du climat
<b>Gip</b>	Groupement d'intérêt public
<b>Glas</b>	Geoscience laser altimeter system
<b>Globec</b>	Global ocean ecosystem dynamics

## • Acronymes

<b>Gloss</b>	Global sea level observing system
<b>GMES</b>	Global monitoring for environment and security
<b>GMMC</b>	Groupe mission mercator coriolis
<b>Goce</b>	Gravity field and steady-state ocean circulation explorer
<b>GOODhope</b>	Réseau de mesures à long terme dans l'Océan Austral le long d'une radiale reliant les continents africain et antarctique.
<b>Grace</b>	Gravity recovery and climate experiment
<b>GTN</b>	Groupe thématique national
<b>Hibiscus</b>	Impact of tropical convection on the upper troposphere and lower stratosphere at global scale experiment
<b>Iasi</b>	Infrared atmospheric sounding interferometer
<b>Iatos</b>	Ingénieurs, administratifs, techniciens et ouvriers de service
<b>Icare</b>	Interaction clouds aerosols radiations
<b>Icram</b>	Istituto centrale per la ricerca scientifica e tecnologica applicata al mare
<b>ICSU</b>	Comité international pour la science (anciennement Conseil international des Unions)
<b>Idaf</b>	Igac-debits-Africa
<b>Idao</b>	Interactions et dynamique de l'océan et de l'atmosphère
<b>Idris</b>	Institut du développement et des ressources en informatique scientifique
<b>IEO</b>	Institut espagnol d'océanographie
<b>Ifremer</b>	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
<b>Igac</b>	International global atmospheric chemistry
<b>IGBP</b>	International geosphere-biosphere program
<b>IHDP</b>	International human dimension program on global environmental change
<b>IHOP</b>	International H <sub>2</sub> O project
<b>Images</b>	International marine ocean change studies
<b>Imber</b>	Integrated marine biogeochemistry and ecosystem research
<b>Indoex</b>	Indian ocean experiment
<b>Ineris</b>	Institut national de l'environnement et des risques
<b>Insu</b>	Institut national des sciences de l'univers
<b>Introp</b>	Interdisciplinary tropospheric research
<b>IPCC</b>	Intergovernmental panel on climate change
<b>Ipev</b>	Institut Paul Emile Victor
<b>IPO</b>	International project office
<b>IPPC</b>	Intergovernmental panel on climate change
<b>IPSL</b>	Institut Pierre-Simon Laplace
<b>IRD</b>	Institut de recherche pour le développement
<b>IRPHE</b>	Institut de recherche pour les phénomènes hors équilibre
<b>Isba</b>	Interactions sol-biosphère-atmosphère
<b>ITA</b>	Ingénieurs techniciens administratifs
<b>ITARF</b>	Ingénieurs techniciens administratifs de recherche et de formation
<b>IUGG</b>	International union of geodesy and geophysics
<b>Jgofs</b>	Joint global ocean flux studies
<b>JMR</b>	Jason-1 microwave radiometer
<b>Keops</b>	Kerguelen compared study of the ocean and the plateau in surface water
<b>Lamp</b>	Laboratoire de météorologie physique
<b>Leandre</b>	Lidar aéroporté pour l'étude des aérosols, des nuages, de la dynamique, du rayonnement et du cycle de l'eau
<b>LEFE</b>	Les enveloppes fluides et l'environnement
<b>Lite</b>	Lidar in-space technology experiment
<b>Liteau</b>	Programme du MEDD portant sur la gestion durable du littoral
<b>LMD</b>	laboratoire de météorologie dynamique
<b>LMDZ</b>	Modèle du LMD
<b>LOICZ</b>	Interactions continent-océan en zone côtière
<b>LRA</b>	Laser retroreflector array
<b>LSCE</b>	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
<b>LTHE</b>	laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement
<b>Map</b>	Mesoscale alpine programme
<b>Marbef</b>	Marine biodiversity and ecosystem functioning

<b>Marel</b>	Mesures automatisées en réseau pour l'environnement littoral
<b>Mast</b>	Marine science and technology programme
<b>MEDD</b>	Ministère de l'environnement et du développement durable
<b>Medex</b>	Mediterranean experiment
<b>Mercator-Océan</b>	GIP en charge de la mise en œuvre d'un modèle opérationnel d'océanographie globale
<b>Meris</b>	Medium resolution imaging spectrometer
<b>Mersea</b>	Marine environment and security for european area
<b>Meso-NH</b>	Modèle méso-échelles non hydrostatique
<b>Mipas</b>	Michelson interferometer for passive atmospheric sounding
<b>Mocage</b>	Modèle de chimie atmosphérique à grande échelle
<b>modcou</b>	Modélisation hydrologique
<b>Modis</b>	Moderate resolution imaging spectroradiometer
<b>Monumeeep</b>	Modélisation/observation des nuages à multi-échelles pour l'étude de processus
<b>Mozaic</b>	Measurement of ozone and water vapour by airbus in-service aircraft
<b>Nasa</b>	National aeronautics and space administration
<b>NCAR</b>	National center for atmospheric research
<b>NCEP</b>	National center for environmental prediction
<b>NDACC</b>	Network for the detection of atmospheric composition changes
<b>Noaa</b>	National oceanic and atmospheric administration
<b>NPZD</b>	Nutritif-phytoplancton-zooplancton-détritique
<b>OA</b>	Océan atmosphère
<b>OCO</b>	Orbiting carbon observatory
<b>Odin</b>	Mission d'astronomie et d'étude de l'atmosphère
<b>OERE</b>	Observatoires européens de recherche en environnement
<b>Ofeg</b>	Ocean facilities exchange group
<b>OHM-CV</b>	Observatoire hydro-météorologique méditerranéen Cévennes Vivarais
<b>Oiso</b>	Service d'observation de l'océan Indien
<b>OMM</b>	Organisation météorologique mondiale
<b>Omp</b>	Observatoire midi-pyrénées
<b>ONG</b>	Organisation non gouvernementale
<b>OPA</b>	Modèle de circulation générale des océans
<b>ORE</b>	Observatoire de recherche en environnement
<b>OSTM</b>	Ocean surface topography mission
<b>Osu</b>	Observatoire des sciences de l'Univers
<b>Ovide</b>	Observatoire de la variabilité interannuelle et décennale en Atlantique nord
<b>Pages</b>	Past global changes
<b>Parasol</b>	Polarisation et anisotropie des reflectances au sommet de l'atmosphère, couplées avec un satellite d'observation emportant un lidar
<b>Patom</b>	Programme atmosphère et océan multi-échelles
<b>PCRD</b>	Programme cadre de recherche et développement
<b>PCRDT</b>	Programme cadre de recherche technologique
<b>PhotonS</b>	Photométrie pour le traitement opérationnel de normalisation satellitaire
<b>Pirata</b>	Pilot research moored array in the tropical atlantic
<b>PJTT</b>	Paleo-JGOFs task team
<b>PMIP</b>	Paleoclimate modelling intercomparison project
<b>PNCA</b>	Programme national de chimie atmosphérique
<b>PNDR</b>	Programme national déterminisme du recrutement
<b>PNEAT</b>	Programme national efflorescence algale toxiques
<b>PNEDC</b>	Programme national d'étude de la dynamique du climat
<b>PNRA</b>	Programme nationale recherche in Antartide
<b>PNRCO</b>	Programme national récifs coralliens
<b>PNRH</b>	programme national de recherche en hydrologie
<b>PNTS</b>	Programme national de télédétection spatiale
<b>Polder</b>	Polarization and directionality of the earth's reflectance
<b>Pomme</b>	Programme océan multidisciplinaire méso échelle
<b>Primequal</b>	Programme de recherche interorganisme pour une meilleure qualité de l'air à l'échelle locale
<b>Prism</b>	Programme for integrated earth system modelling

## • Acronymes

<b>Proof</b>	Programme national : processus biogéochimiques dans l'océan et flux
<b>Rex</b>	Réseau d'excellence
<b>RNSN</b>	Réseau national des stations marines
<b>Rosame</b>	Réseau de marégraphes
<b>ROV</b>	Remote operated vehicle
<b>SAF</b>	Satellite application facilities
<b>Safire</b>	Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement
<b>Safran</b>	Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige
<b>Sar</b>	Synthetic aperture radar
<b>Satmos</b>	Service d'archivage et de traitement météorologique des observations spatiales
<b>SC</b>	Sciences chimiques
<b>SCAR</b>	Scientific committee on Antarctic research
<b>SCoa</b>	Surfaces continentales océan atmosphère
<b>Scor</b>	Scientific committee on oceanic research
<b>Scout</b>	Stratospheric climate links with emphasis on the upper troposphere and lower stratosphere
<b>SDLA</b>	Spectromètre à diodes laser accordables
<b>SDV</b>	Sciences de la vie
<b>Seawifs</b>	Sea-viewing wide field of view sensor
<b>Shom</b>	Service hydrographique et océanographique de la marine
<b>SHS</b>	Sciences humaines et sociales
<b>SIC</b>	Surfaces et interfaces continentales
<b>Sim</b>	Safran-Isba-Modcou
<b>Sirta</b>	Site instrumental de recherche par télédétection atmosphérique
<b>SMF</b>	sondeur multi faisceaux
<b>Smos</b>	Soil moisture and ocean salinity
<b>SO</b>	Service d'observation
<b>Solas</b>	Surface ocean lower atmosphere study
<b>Somlit</b>	Service d'observation en milieu littoral
<b>SPI</b>	Sciences physiques pour l'ingénieur
<b>SPM</b>	Sciences physiques et mathématiques
<b>SPOT</b>	Satellite d'observation de la terre
<b>SSS</b>	Sea surface salinity
<b>TES</b>	Tropospheric emission spectrometer
<b>Theseo</b>	Third european stratospheric experiment ozone
<b>Thorpex</b>	The observing-system research and predictability experiment
<b>Topex-Poseidon</b>	Satellite altimétrie
<b>Troc</b>	Tropospheric sounder for chemistry and climate
<b>Troccinox</b>	Tropical convection cirrus and nitrogen oxides experiment
<b>TRSR</b>	Turbo rogue space receiver
<b>UMR</b>	Unité mixte de recherche
<b>UMS</b>	Unité mixte de service
<b>UNEP</b>	United nations environment programme (Programme des nations unies pour l'environnement (PNUÉ))
<b>Unesco</b>	United nations educational, scientific and cultural organisation
<b>UTLS</b>	Upper troposphere lower stratosphere
<b>Uvec</b>	Ultra violet radiation in marine ecosystems
<b>Vacso</b>	Prévisions des vol aéroclipper et ballons pressurisés couche limite
<b>WCRP</b>	World climate research program
<b>Woce</b>	Woce ocean circulation experiment
<b>WWRP</b>	World weather research program

### Légendes de la mosaïque de couverture :

(haut, gauche) : Deuxième campagne océanographique (Pomme 1) du programme Pomme (Programme Océan Multidisciplinaire Méso Echelle) (Réf. CNRS-INFO N°388 Décembre 2000). © CNRS Photothèque, Photographe : RIMMELIN, Peggy / FERNANDEZ, Camila.

(haut, droite) : Vue de la zone industrielle à partir de la station de Aifobep (Martigues). © CNRS Photothèque/ESCOMPTE, Photographe : LENGEREAU, Rémi.

(bas, gauche) : Arrivée d'un courant de densité "tracé" par les particules du sol qu'il soulève au fur et à mesure de sa progression, à Hombori au Mali. Ce phénomène, de nature convective, porte le nom de haboob. © CNRS Photothèque, Photographe : GUICHARD, Françoise / KERGOAT, Laurent.

(bas droit) : Ile des Pétrels (piste du Lion) en fin de saison d'été austral, près de la base française de Dumont d'Urville. © CNRS Photothèque, Photographe : DUPRAT, Jean / ENGRAND, Cécile.



## Communication de l'Insu

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

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

Mai 2007