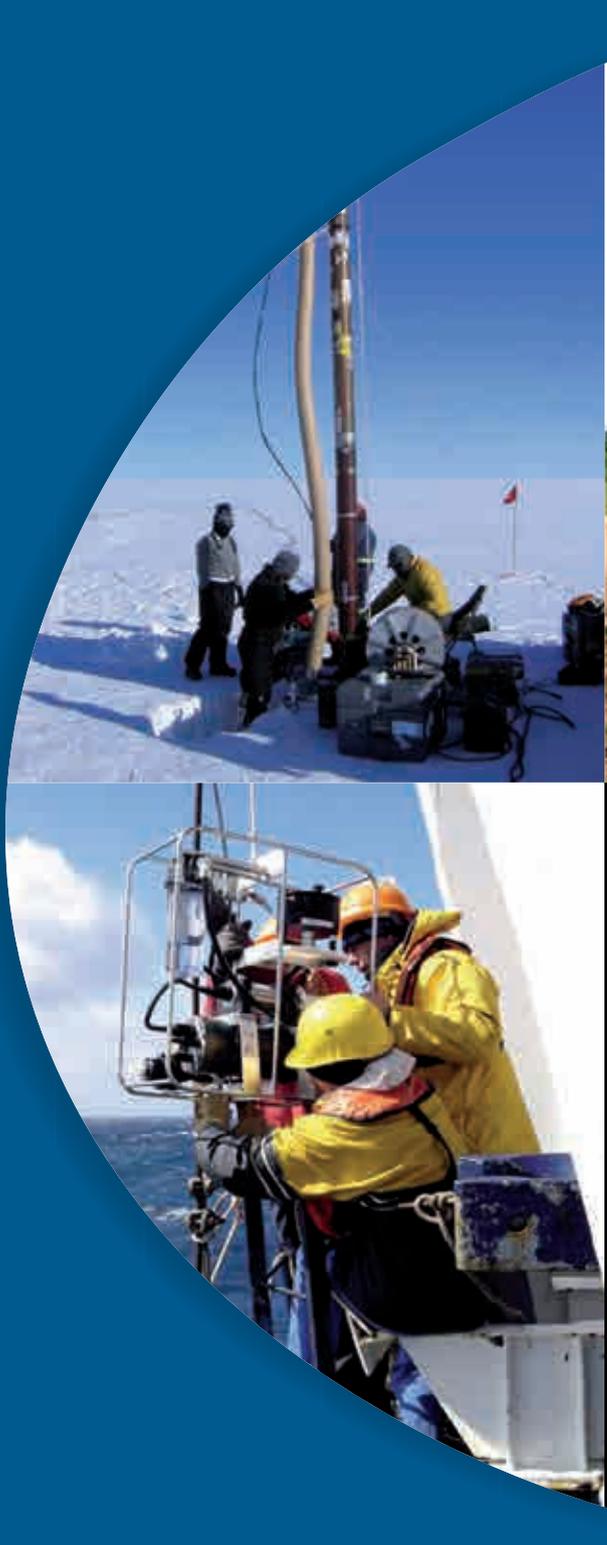


# Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



Océan Atmosphère  
2011-2016



# Bilan et Prospective 2011-2016 de la Commission spécialisée Océan Atmosphère de l'Institut national des sciences de l'Univers

## Synthèse des ateliers préparatoires et du colloque de Fontaine 2 - 4 mars 2011

Sous la direction de Herlé Mercier, Président de la CSOA.

Ont participé à la rédaction de ce document

### • des membres de la CSOA

Michel Arhan, Stéphane Blain, Philippe Bonneton, Éric Brun, Vincent Cassé, Nadine Chaumerliac, Alain Dabas, Martine De Angelis, Pascale Delecluse, Jean-François Doussin, Patrick Farcy, Yves Gouriou, Francis Grousset, Alain Hauchecorne, Serge Heussner, Catherine Jeandel, Gerhard Krinner, Patrick Mascart, Herlé Mercier, Étienne Ruellan et Claire Waelbroeck.

### • les membres des groupes de travail animés par

Gérard Ancellet, Bernard Barnier, Luc Beaufort, Matthias Beekmann, Éric Blayo, Marc Bocquet, Sandrine Bony, Pascale Braconnot, Michel Calzas, François Carlotti, Christophe Cassou, Elsa Cortijo, Jean-Louis Dufresne, Fabienne Gaillard, Antoine Grémare, Marie-Noëlle Houssais, Hans-Werner Jacobi, Serge Janicot, Céline Mari, Pascal Morin, Serge Planton, Alain Podaire, Florence Sylvestre et Anne-Marie Tréguier.

### • des représentants des organismes partenaires

Cyril Moulin (CEA), Carole Deniel, Juliette Lambin et Didier Renaut (CNES), Damien Bilbault (EDF), Patrick Vincent (Ifremer), Christine David (IPEV), Pierre Soler et Robert Arfi (IRD) et Philippe Bougeault (Météo-France).

### • des membres de la direction

Christian Abonnel, Dominique Armand, Philippe Bertrand, Pascale Ebner, Gérard Eldin, Sophie Godin-Beekmann, Denis-Didier Rousseau, Éric Villenave et François Vial.

### Secrétariat de rédaction

Dominique Armand



# Sommaire

Éditorial .....	p. 6
Résumé des conclusions et recommandations .....	p. 9

## **Bilan 2006 - 2010**

Introduction .....	p. 14
Réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre .....	p. 15
Analyse des processus et flux aux interfaces .....	p. 25
Étude des impacts des changements globaux .....	p. 28
Les chantiers régionaux .....	p. 30
Forces et faiblesses de la communauté .....	p. 37

## **Prospective scientifique**

Enjeux scientifiques majeurs dans le domaine des enveloppes fluides .....	p. 40
Approche intégrée des changements environnementaux planétaires à l'échelle régionale .....	p. 47

## **Moyens et ressources humaines**

Programmes nationaux .....	p. 54
Services et moyens nationaux, développement technologique .....	p. 56
Ressources humaines .....	p. 65

## **Acronymes**

# Éditorial

La Commission spécialisée Océan Atmosphère du CNRS-INSU mobilise régulièrement la communauté scientifique (CNRS, Universités, organismes partenaires) pour un exercice national de prospective scientifique. Celui-ci commence par une large consultation de la communauté et s'achève par un débat final, un « colloque de prospective », dont les conclusions en termes de priorités scientifiques et moyens d'accompagnement donnent lieu à un rapport qui sert à l'établissement du schéma directeur du CNRS-INSU.

Le précédent exercice de prospective, dont le colloque final a eu lieu à Lille en novembre 2005, avait identifié trois grandes priorités scientifiques pour les 10 à 15 ans à venir, priorités qui s'inscrivent dans les grands programmes européens et internationaux : la réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre, l'analyse des processus et flux aux interfaces et l'étude des impacts du changement global. Trois régions avaient également été mises en avant comme devant bénéficier de la mise en place de projets coordonnés : le bassin méditerranéen, les régions polaires et l'Afrique de l'Ouest. Un certain nombre de recommandations avaient également été formulées concernant les méthodes, moyens et outils. Enfin, la volonté de rendre les programmes nationaux plus attractifs et de renforcer leur rôle structurant avait conduit à la création en 2006 du programme national interorganisme LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement).

La prospective 2011-2016 a été préparée par différents groupes de travail et « finalisée » lors du colloque qui a rassemblé à Fontaine en mars 2011 une large partie de la communauté Océan Atmosphère (chercheurs, ingénieurs et techniciens non seulement du CNRS mais aussi des Universités et organismes partenaires : Météo-France, Ifremer, IRD, CEA et CNES, pour ne citer que ceux avec lesquels les relations sont les plus intenses). Tout au long de ces réflexions, le nouveau panorama de la recherche française créé par les nombreuses réformes de ces dernières années visant à restructurer la recherche, tels la création de l'ANR, la Loi sur la responsabilité des universités, la création des instituts du CNRS, le « grand emprunt » et la mise en place de l'Alliance pour l'environnement AllEnvi, a naturellement été pris en compte.

Considérant que les grandes priorités scientifiques établies à Lille étaient encore d'actualité pour l'essentiel, la communauté a précisé les grandes questions scientifiques auxquelles elle devra répondre au cours des 5 prochaines années et les moyens d'accompagnement qui devront être mis en œuvre pour atteindre cet objectif. Je retiens notamment qu'elle préconise de privilégier l'étude des processus physiques, physicochimiques et biogéochimiques qui contrôlent la dynamique et la variabilité des milieux et de leurs interfaces sur une large échelle de temps et d'espace. Une meilleure connaissance de ces processus permettra en effet de mieux simuler tout ou partie du Système Terre, et ainsi de mieux comprendre son évolution passée et prévoir son évolution future, aussi bien à des fins opérationnelles que pour l'établissement de projections climatiques solides. Concernant les chantiers, la communauté recommande de mettre l'accent sur l'étude des changements environnementaux en régions méditerranéenne et arctique.

Durant cet exercice, le programme LEFE a été reconnu comme étant un outil essentiel pour la structuration de la communauté et l'accroissement des connaissances dans le domaine Océan Atmosphère. Néanmoins, il a été proposé de réorganiser ses actions thématiques afin de mieux prendre en compte les évolutions des différents domaines scientifiques, ainsi que d'y intégrer le programme GMMC (Groupe mission Mercator Coriolis) ce qui a été fait depuis lors. En regroupant toutes les demandes nécessaires à la réalisation d'un projet, LEFE permet aussi une meilleure visibilité des coûts consolidés. Enfin, l'implication des organismes partenaires *via* son Comité interorganisme et la diversité des origines institutionnelles des personnels impliqués sont un atout majeur pour la reconnaissance de ce programme au niveau national. C'est parce que je considère ce programme comme fondamental pour la communauté que j'ai choisi, dans une situation budgétaire difficile, de maintenir son budget constant, aux dépens d'autres structures dont les laboratoires, tout en étant bien conscient qu'il est important que ceux-ci aient les moyens de vivre et de créer une dynamique scientifique en leur sein.

Cet exercice de prospective a aussi permis d'engager une discussion sur l'avenir de la Commission spécialisée Océan Atmosphère (CSOA) et d'en reconnaître l'importance. En effet, les commissions spécialisées ne sont plus des instances obligatoires pour le CNRS-INSU dans le nouveau cadre qui est le sien depuis la création des instituts du CNRS. Considérant comme primordial leur rôle de conseil auprès de la Direction et de relais entre la Direction et la communauté, le Comité exécutif de la Direction du CNRS-INSU a depuis lors décidé de les maintenir. Je compte sur la CSOA pour notamment clarifier le processus de labellisation des Services nationaux labellisés, m'aider à optimiser au mieux les ressources humaines et budgétaires et suivre, évaluer et mettre en œuvre les programmes (LEFE, PNTS, MISTRALS ainsi que le chantier Arctique). Elle devra évidemment s'assurer de la mise en œuvre de la prospective. J'espère qu'elle n'hésitera pas à s'autosaisir de questions qui lui sembleront importantes pour l'avenir de la communauté.

Outre les programmes LEFE et PNTS et la CSOA, le troisième pilier sur lequel je m'appuie en tant que Directeur adjoint scientifique Océan Atmosphère est représenté par les délégués scientifiques et chargés de mission dont l'action, non seulement au jour le jour mais aussi sur le long terme, est indispensable pour une gestion « optimale » à la fois des laboratoires, observatoires des sciences de l'Univers et fédérations de recherche, et de la communauté au sens large. Sans leur précieuse collaboration, il me serait impossible de suivre tout ce qui se passe dans le domaine Océan Atmosphère, aux niveaux national, européen et international.

Sans oublier toutes celles et tous ceux ayant apporté leur contribution aux réflexions, à l'organisation du colloque et à la réalisation de ce document, je tiens à remercier la CSOA, et tout particulièrement son président Herlé Mercier, pour l'organisation de cet exercice de prospective. Celui-ci a permis d'établir la feuille de route de la communauté pour les 5 années à venir, dont j'espère qu'elle sera le point de départ de nouvelles recherches de haut niveau.

**Jean-Marie Flaud**

Directeur scientifique adjoint Océan Atmosphère



# Résumé des conclusions et recommandations

**C**e résumé présente dans leurs grandes lignes les objectifs scientifiques prioritaires et les recommandations concernant les outils et moyens, issus de la réflexion prospective menée par la communauté Océan Atmosphère du CNRS-INSU et de ses organismes partenaires.

## ■ Objectifs scientifiques

- Développer des synergies entre étude de processus et modélisation des enveloppes fluides pour améliorer la prévision météorologique, la prévision saisonnière à décennale et les projections climatiques, de l'échelle globale et à l'échelle régionale ;
- Encourager les recherches sur les processus spécifiques aux interfaces entre les différents milieux, essentielles pour la compréhension, la quantification et une meilleure simulation des flux contrôlant *in fine* l'équilibre général du Système Terre ;
- Étudier l'impact du changement global sur les milieux (océan, atmosphère, cryosphère) ;
- Relever les nouveaux défis dans le domaine de la modélisation en étendant les recherches sur les méthodes numériques au-delà du cadre traditionnel de l'assimilation de données ;
- Renforcer les synergies entre recherche fondamentale et applications opérationnelles ;
- Contribuer à l'étude intégrée des changements environnementaux au niveau du bassin méditerranéen (chantier MISTRALS) et en Arctique, et promouvoir les produits opérationnels développés en Afrique de l'Ouest.

## ■ Méthodes

- Renforcer la complémentarité entre observation et modélisation, en favorisant en particulier l'acquisition d'observations à long terme (*in situ* et satellitaires) et d'archives climatiques aux échelles cohérentes avec la modélisation (haute résolution spatiale et temporelle) ;

- Favoriser l'expérimentation *in situ* (mésocosmes, chambres de simulation...) et en laboratoire.

## ■ Outils et moyens

### • Les observations

#### Pour la flotte océanographique

- Anticiper les besoins croissants en temps bateau des études en zones côtière et littorale concernant aussi bien des missions d'intérêt public que des recherches pluridisciplinaires et l'enseignement ;
- Maintenir les navires de la flotte océanographique française au meilleur niveau de performance, faire évoluer la flotte afin d'avoir accès au semi-hauturier, continuer à garantir l'accès à un système de prélèvement des sédiments marins (carottier long de 60 m et plus) et permettre à la communauté française d'accéder à un brise-glace ;
- Garantir et financer un quota global de temps bateau pour les campagnes évaluées positivement par la commission Flotte et harmoniser les procédures afin que les avis scientifiques rendus par d'autres instances (LEFE, PNTS, ANR, Europe...) soient pris en compte lors de l'évaluation des campagnes par cette commission.

#### Pour la flotte aéroportée

- Préserver le programme EUFAR, pour notamment pouvoir accéder à des avions à long rayon d'action ;
- Permettre l'accès à la très haute altitude *via*, par exemple, des coopérations avec la Russie (Geophysika) ou les États-Unis (Global Hawk) ;

- Promouvoir l'utilisation des drones dans les basses couches de l'atmosphère.

#### Pour les ballons

- Mettre en place des bases opérationnelles de lancement aux moyennes latitudes et aux latitudes équatoriales ;
- Développer des ballons stratosphériques ouverts de moyenne durée (quelques jours) ou de longue durée (quelques semaines) et pouvant emporter des charges utiles lourdes.

#### Pour les Services nationaux labellisés du périmètre Océan Atmosphère

- Maintenir des outils aux performances reconnues et validées, pour l'observation régulière des milieux naturels sur de longues périodes (> 10 ans) tant pour la recherche fondamentale que pour la recherche appliquée ;
- Établir et maintenir un dialogue continu entre porteurs de service et organismes : la labellisation doit reposer sur une contractualisation formelle, revue périodiquement, définissant précisément le périmètre d'action du service (paramètres), assurant un accès pérenne à des données clairement documentées et précisant les moyens humains et matériels mis à disposition par les tutelles responsables ;
- Veiller à assurer la mise à disposition de moyens universitaires significatifs pour les activités d'observation au sein des OSU lors des négociations entre le CNRS-INSU et les Universités.

#### • La modélisation et le calcul intensif

- Se maintenir au meilleur niveau international en terme de puissance de calcul, avec des machines adaptées aux problématiques de la communauté ;
- Contribuer à ce que le CNRS-INSU défende les intérêts de la communauté dans la définition de la stratégie nationale en calcul intensif ;

- Favoriser le développement de modules partagés entre les différents codes, tant sur le volet des méthodes mathématiques incorporées aux modèles que sur celui de l'évaluation des résultats ;

- Mettre en place des systèmes pérennes, faisant intervenir à la fois les groupes de modélisation et les centres de calcul et se basant sur le modèle des Services d'observation, pour diffuser les résultats des simulations numériques auprès de la communauté scientifique ;
- Soutenir les codes communautaires dans leur effort de convergence vers une plateforme commune.

#### • L'instrumentation

- Permettre aux unités de recherche de rester le lieu privilégié du développement instrumental, notamment en recrutant des chercheurs, ingénieurs et techniciens spécialisés dans le développement technologique ;
- Conforter la Division technique du CNRS-INSU dans son rôle essentiel d'accompagnement des unités ;
- Favoriser l'adaptation de technologies utilisées dans d'autres domaines et développer davantage la collaboration entre organismes (en particulier entre le CNES et le CNRS).

#### • La programmation de la recherche

- Renforcer la cohérence de la programmation des projets de recherche s'intéressant à des échelles de variabilité différentes, en regroupant dans une même action du programme LEFE les études visant à une meilleure compréhension des processus physiques et biogéochimiques participant au fonctionnement de l'océan, de l'atmosphère et de la glace et à leurs interactions, et veiller dans le même temps à l'amélioration de la prise en compte de ces processus dans les modèles pour des échelles de temps allant de l'heure au plurimillénaire et des échelles spatiales allant du global au régional ;

- Favoriser les recherches aux interfaces entre l'océan, l'atmosphère et la cryosphère et œuvrer pour la création, au niveau du CNRS-INSU, d'un programme sur l'étude des interfaces ;
  - Favoriser les synergies entre recherche fondamentale et recherche appliquée ;
  - Ancrer encore plus le programme LEFE dans la dynamique des programmes internationaux en s'appuyant sur les membres de la communauté nationale impliqués dans la gestion de ces programmes ;
  - Soutenir les chantiers car ils favorisent le renforcement des compétences existantes et permettent l'émergence de nouvelles compétences, notamment aux interfaces entre disciplines.
- **Les ressources humaines**
  - Augmenter le nombre d'ingénieurs, administratifs, techniciens et ouvriers de service des universités (IATOS) dans les laboratoires, actuellement trois fois plus faible que celui de leurs homologues CNRS ;
  - Maîtriser le recours croissant aux personnels sur contrats à durée déterminée, qui demande un très gros effort de formation et peut conduire à une perte d'expertise dans les laboratoires, notamment en ne faisant appel à des personnels en CDD que s'ils pallient un manque de forces ponctuel ;
  - Attirer l'attention des organismes sur les conséquences des recrutements (permanents et CDD) réalisés prioritairement en BAP E (informatique, statistique et calcul scientifique) par les laboratoires, les recrutements en BAP C pour l'expérimentation et l'acquisition de données hors télédétection qui sont fondamentaux pour la communauté ne devant pas être négligés.



# Bilan 2006-2010

# Introduction

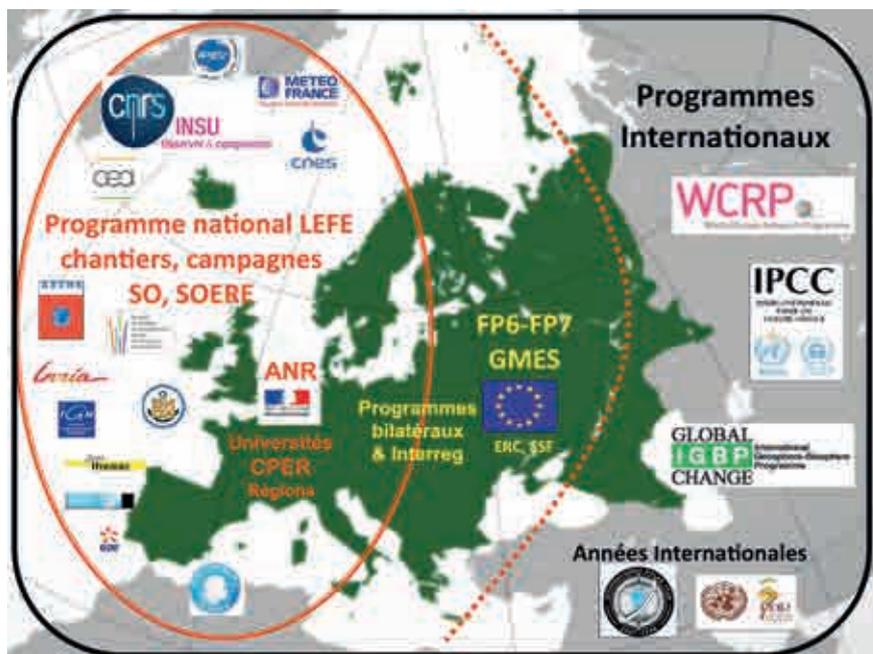
Lors du précédent exercice de prospective Océan Atmosphère (Lille, 2005), trois thématiques scientifiques prioritaires avaient été identifiées : la réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre, l'analyse des processus et flux aux interfaces et l'étude des impacts des changements globaux. Trois régions (Bassin Méditerranéen, Régions Polaires et Afrique de l'Ouest) avaient également été mises en exergue, pour lesquelles la mise en place de projets coordonnés avait été recommandée. En outre, un certain nombre de recommandations concernant les méthodes, moyens et outils avait été formulées. La volonté exprimée durant cette prospective de rendre les programmes nationaux plus attractifs et d'en mutualiser les moyens s'est concrétisée par la création en 2006 du programme national interorganisme LEFE (Les enveloppes fluides et l'environnement), regroupant des actions auparavant indépendantes.

Durant la période 2006-2010, LEFE a permis la mise en place de projets ambitieux, s'inscrivant souvent dans un contexte international, dans le cadre d'accords bilatéraux (par exemple avec l'Allemagne en chimie atmosphérique), de programmes internationaux (SOLAS, CLIVAR, GEOTRACES, GEWEX, IGAC,

SPARC...) ou de projets européens. Les approches fréquemment multidisciplinaires de ces projets ont le plus souvent couplé observation, expérimentation et modélisation et intégré une grande variété d'échelles de temps et d'espace.

Plus généralement, les projets de la communauté Océan Atmosphère du CNRS-INSU ont été menés grâce au soutien fort du CNRS-INSU, des universités, des organismes partenaires et de l'Europe avec une implication croissante des structures régionales et de l'ANR. Ils ont bénéficié des moyens lourds d'accompagnement fournis par le CNRS-INSU et ses partenaires. Certains ont intégré une dimension opérationnelle, contribuant ainsi à répondre aux préoccupations sociétales.

Dans ce bilan, seuls les résultats les plus représentatifs des années 2006-2010 sont présentés. Ils sont souvent liés aux événements majeurs de cette période : l'Année internationale des déserts en 2006, l'Année polaire internationale en 2007-2008, la publication en 2007 du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC dont les auteurs (parmi lesquels plusieurs membres de la communauté Océan Atmosphère française) ont été récompensés par le prix Nobel de la Paix.



Panorama des programmes et organismes en Océan Atmosphère.

# Réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre

La réduction des incertitudes sur la modélisation du Système Terre est un objectif ambitieux qui recouvre plusieurs dimensions : l'amélioration des systèmes d'observation, une meilleure connaissance des processus et l'amélioration des modèles (leur validation et leur couplage aux observations par assimilation de données).

## ■ Les systèmes d'observation et les processus

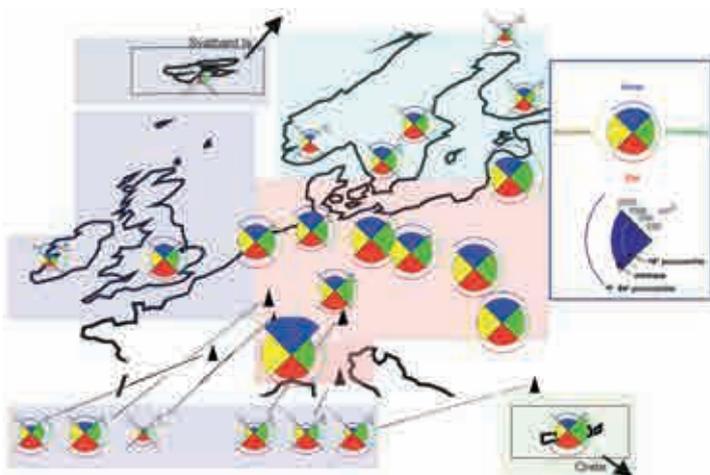
### • Les aérosols et les processus chimiques dans la troposphère

Concernant l'impact des mégapoles, la formation et les propriétés radiatives et toxicologiques des aérosols urbains ont été étudiées en Île-de-France (Paris), aussi bien sur le plan expérimental que sur celui de la modélisation (MEGAPOLI). Les analyses ont montré notamment que la quantité d'aérosols fins ( $\text{Ø} < 2.5\mu\text{m}$ ) était contrôlée majoritairement à l'échelle régionale par l'advection. En hiver, la combustion de bois est une source locale d'aérosols organiques aussi importante que le trafic. Un résultat similaire a été obtenu dans le cadre d'une étude en vallées alpines (POVA). De manière générale, la combustion de biomasse est une source importante d'aérosols organiques en hiver dans toute la

troposphère libre européenne (CARBOSOL et EUCAARI), mais aussi à une échelle plus locale.

Des études à l'échelle régionale centrées sur l'Europe (EUCAARI), l'Afrique (AMMA) et l'Arctique (POLARCAT) ont permis de quantifier les sources primaires et secondaires d'aérosols organiques. Pour la première fois, des évaluations fiables de l'impact des politiques de réduction des émissions des précurseurs d'aérosols sur le climat européen futur (2040) ont ainsi pu être proposées.

Des avancées ont été réalisées grâce aux études de processus chimiques, en phase gazeuse, liquide ou particulaire, menées dans des chambres environnementales ou sur le terrain en atmosphère naturelle. L'amélioration de la précision des mesures cinétiques et ainsi de la compréhension des mécanismes réactionnels a permis de mieux décrire la composition chimique de la haute troposphère. Ainsi, les études, aussi bien théoriques qu'expérimentales, de dégradation de plusieurs grandes familles de composés organiques volatiles (terpènes, fluorés, carbonyles) ont permis d'améliorer grandement la précision des relations entre la structure et la réactivité des molécules utilisées par les modélisateurs. Le devenir des polluants primaires et secondaires est maintenant mieux appréhendé et leurs sources mieux contraintes, en particulier pour les aérosols organiques secondaires. Ainsi, les temps de vie des esters vinyliques ont été déterminés par des mesures en chambre de simulation. Ces travaux ont été réalisés grâce à la collaboration, favorisée par LEFE, des communautés gaz et aérosols.



Vue intégrée de l'aérosol européen. Les observations réalisées de manière systématique (par exemple au Puy de Dôme) et lors de campagnes aéroportées (ATR 42) ont permis de nettement améliorer la connaissance et l'impact des aérosols en Europe. La quantité d'aérosols (taille des cercles) est donnée pour chaque saison (couleurs). © CNRS/LGGE

## • La chimie de la haute troposphère et de la stratosphère

Une question clé concerne les phénomènes convectifs en région tropicale. La convection tropicale contrôle en effet le transport de vapeur d'eau à travers la tropopause (fontaine stratosphérique) et permet le transport d'espèces de courte durée de vie destructrices d'ozone. L'étude de la haute troposphère et de la basse stratosphère s'est appuyée sur des campagnes avions et ballons au Brésil (HIBISCUS, TROCINOX, TERESINA) et en Afrique (AMMA-SCOUT/O3) ainsi que sur des mesures satellitaires (CALIPSO, ODIN). Les injections sporadiques continentales de vapeur d'eau associées au fort développement vertical de cumulo-nimbus ont été quantifiées.

Les processus chimiques dans la stratosphère polaire en été, quand les conditions de développement du vortex polaire se mettent en place, constituent également une question importante, aussi bien pour le pôle Nord que pour le pôle Sud. L'étude de la stratosphère en été s'est appuyée sur des mesures d'aérosols et d'halogènes à partir de ballons, par exemple avec l'instrument SPIRALE au-dessus de Kiruna en Suède (STRAPOLETÉ 2005 et 2008). Ainsi, le rôle important des mécanismes dynamiques spécifiques de cette période, comme le déferlement des ondes de Rossby qui provoque l'injection d'aérosols et de polluants troposphériques dans la stratosphère au-dessus des pôles, a été montré.

Parallèlement à ces études de processus, la modélisation de la stratosphère a beaucoup avancé sur la question du couplage chimie – climat avec la prise en compte de l'impact des gaz à effet de serre et des chlorofluorocarbones (CFC) sur l'ozone stratosphérique et de l'influence de l'évolution de la couche d'ozone sur le climat (RECONCILE et SPARC CCMVAL).

## • La variabilité de la composition atmosphérique

Le suivi de la variabilité de la composition atmosphérique et des processus associés a grandement bénéficié des observations obtenues dans le cadre des Services d'observation. Fiables sur le long terme, ces observations ont permis d'étudier tant les problèmes de qualité de l'air que les aspects climatiques.

L'analyse des observations recueillies par le Service d'observation MOZAIC et son extension européenne IAGOS a permis des avancées sur la connaissance des transformations photochimiques des émissions naturelles et anthropiques, sur le rôle du transport atmosphérique à longue distance ainsi que sur les échanges entre troposphère et stratosphère. Les mesures du réseau NDACC ont confirmé la stabilisation actuelle de la couche d'ozone stratosphérique antarctique et quantifié le refroidissement de la stratosphère lié à l'augmentation des gaz à effet de serre et à la diminution de l'ozone.



*Les nouveaux outils embarqués sous ballon ont permis de mieux appréhender le rôle de la stratosphère dans la dynamique du climat. Ainsi, le projet STRAPOLETÉ a permis de procéder à l'étude des processus de transport et d'échantillonner les contenus en aérosols et composés halogénés dans la stratosphère arctique durant l'été. © CNRS/LATMOS*

L'instrument IASI a contribué de façon majeure au suivi de la composition atmosphérique. Il a ainsi permis des progrès indéniables sur la mesure de vapeur d'eau et, grâce à la détection d'isotopes, sur la compréhension des processus convectifs. Il a aussi permis de montrer que les sources d'ammoniac dans l'hémisphère nord étaient sous-estimées ce qui empêchait une modélisation correcte de la pollution en particules. L'étude conjointe des mesures de plusieurs espèces a permis de mieux comprendre certains processus chimiques (par ex.  $O_3/HNO_3$  pour la chimie polaire, CO / méthanol / acide formique pour les panaches de feux de forêt). Enfin, l'intérêt opérationnel d'IASI a pu être démontré à la fois pour le suivi des pollutions locale et à grande échelle (feux), grâce à l'assimilation des données dans les modèles développés au niveau européen (GEMS/MACC), et pour la détection des panaches de volcans, avec la prise en compte des données IASI dans les procédures d'alerte.

L'interprétation des mesures IASI sur les surfaces glacées étant un vrai défi (signaux infrarouges très faibles, propriétés d'émission de la glace très mal connues et détection des nuages difficile), une grande campagne internationale de validation, CONCORDIASI, a été organisée en Antarctique. Elle s'est appuyée sur des mesures au sol, des lâchers intensifs de radiosondes et le lâcher d'une flottille de ballons sur-pressurisés emportant des dropsondes. En outre, cette campagne « ballons » a permis d'étudier la dynamique du tourbillon polaire dans la zone de la basse stratosphère où se forme le trou d'ozone.

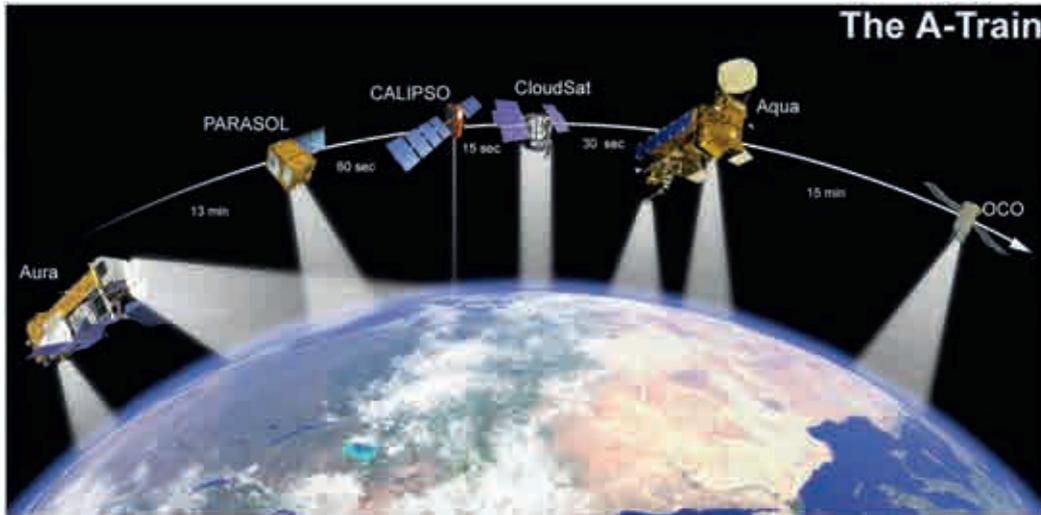
## • L'observation satellitaire des nuages

L'observation satellitaire des nuages a permis de progresser dans deux domaines : la prévision des précipitations et la modélisation de la répartition des nuages et de leurs propriétés radiatives. La radiométrie micro-onde satellitaire jusqu'à 190 GHz (AMSU, SSMI/S et bientôt SAPHIR) fournit à la météorologie opérationnelle les émissivités de la couverture nuageuse et les profils atmosphériques de température au-dessus des terres. L'utilisation simultanée de ces informations avec celles obtenues dans le visible et l'infrarouge a permis d'une part l'analyse de la phase « glace » dans les nuages et d'autre part la production des premières estimations globales des zones inondées. Ceci a conduit les agences spatiales (ESA, EUMETSAT, CNES) à poursuivre des développements instrumentaux entre 200 et 900 GHz pour, à terme, l'observation depuis une orbite géostationnaire des précipitations dues aux phénomènes convectifs.

Des travaux importants (principalement financés par le TOSCA, LEFE et les « mi-lourds » CNRS-INSU) ainsi que la création en 2006 du Pôle de compétence thématique ICARE (portail d'accès unique aux données spatiales françaises pour les nuages, les aérosols, le rayonnement et le cycle de l'eau), ont permis de valoriser les données d'observations spatiales du « train » de satellites A-TRAIN en les couplant à celles d'autres infrastructures de recherche *in situ* et spatiales et de faciliter leur couplage avec la modélisation.



L'interféromètre infrarouge IASI embarqué sur le satellite METOP mesure en continu depuis 2006 une vingtaine de paramètres atmosphériques dont les profils de température et d'humidité, la distribution des nuages, des concentrations d'aérosols, de gaz à effet de serre ( $CO_2$  et  $CH_4$ ), d'ozone ( $O_3$ ), de monoxyde de carbone (CO), d'ammoniac et de dioxyde de soufre ( $SO_2$ ), et des caractéristiques de surface (émissivité, température). © CNES



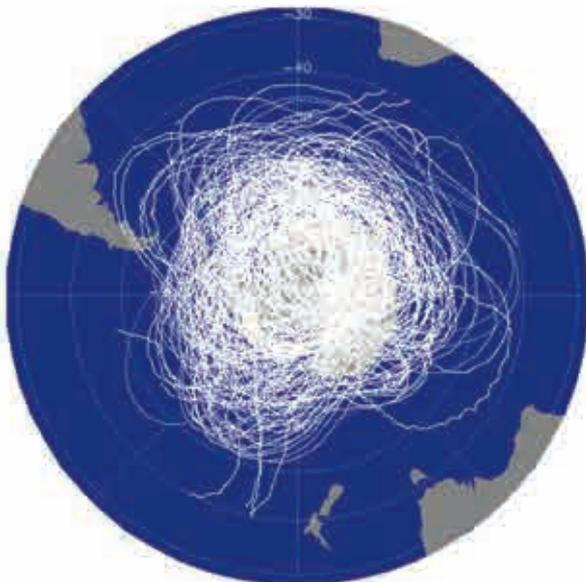
L'A-TRAIN est une série de six satellites franco-américains étudiant simultanément les aérosols et la couverture nuageuse. La communauté Océan Atmosphère française exploite particulièrement les données de CALIPSO et de PARASOL. © CNES

Le lidar CALIOP (bi-longueur d'onde, bi-polarisation) embarqué sur CALIPSO, une composante de l'A-TRAIN, a permis d'évaluer avec une précision inédite la distribution verticale des nuages et de quantifier les sources d'aérosols (feux, pollution, déserts, volcans) ainsi que les types d'aérosols impliqués dans la formation des nuages. Ces travaux ont permis d'améliorer la modélisation de la fréquence de formation des cumulus tropicaux. L'autre composante de l'A-TRAIN, sur laquelle la communauté française a beaucoup investi, a été l'instrument PARASOL qui a permis de mesurer l'anisotropie et la polarisation de la réflectance au sommet de l'atmosphère et de distinguer les aérosols sur un fond nuageux. Les propriétés radiatives des aérosols et des nuages sont désormais mieux contraintes.

## • Les processus dynamiques dans l'atmosphère et dans l'océan

Les expériences *in situ* réalisant des mesures à petite échelle sont un point fort de la communauté. Ainsi, en Antarctique, 27 ballons à longue durée de vie ont été déployés dans la basse stratosphère (STRATEOLE/VORCORE), ce qui a permis d'améliorer les paramétrisations des ondes de gravité dans les modèles de circulation générale.

L'étude des cyclones tropicaux s'est développée grâce à des travaux numériques portant sur la production et la redistribution d'énergie dans les cyclones (notamment le modèle ALADIN-Réunion) et grâce à la mise en place de systèmes d'observation des paramètres atmosphériques (Observatoire de physique de l'atmosphère de la Réunion).



Ensemble des trajectoires de longue durée (2 à 3 mois) des 27 ballons pressurisés lâchés dans la basse stratosphère (~ 20 km d'altitude), depuis la base de Mc Murdo (Antarctique) lors de la campagne VORCORE à la fin de l'hiver austral 2005. © CNRS/LMD

La compréhension des mécanismes océaniques tropicaux et de leur impact sur la variabilité climatique du système couplé océan – atmosphère a été l'objet d'un important effort de recherche. Les premiers résultats issus du projet international SPICE ont permis de mieux comprendre le cheminement des eaux du Pacifique sud-ouest en direction de la bande équatoriale, notamment *via* l'observation de jets en mer de Corail et la modélisation de la circulation en mer des Salomon. Cette circulation est susceptible d'altérer la modulation basse fréquence de la variabilité climatique tropicale ENSO. De nouveaux résultats issus de campagnes et de simulations numériques ont souligné le rôle clé de l'océan Indien d'un point de vue climatique en mettant en évidence l'importance des interactions océan – atmosphère liées à l'oscillation de Madden-Julian et l'influence du dipôle de l'océan Indien sur le développement d'un El Niño l'année suivante.

La prévisibilité de la variabilité intrasaisonnière des précipitations et de la convection tropicale a progressé pour différentes zones d'Afrique. Les raisons pour lesquelles les modèles de circulation générale de l'atmosphère ont des difficultés à représenter le caractère organisé de la convection atmosphérique sont désormais mieux comprises (OCTAVIE).

Les travaux théoriques en mécanique des fluides appliquée à l'atmosphère ont permis une meilleure représentation de la convection à l'intérieur d'une maille de modèle et une meilleure compréhension du rôle de l'humidité dans la cyclogenèse. Les développements en assimilation variationnelle de données ont permis la mise en œuvre de ce type d'assimilation à l'échelle kilométrique dans le modèle AROME. Pour l'océan, des expériences sur plaque tournante en laboratoire ont permis de quantifier la formation de structures agéostrophiques de submésos-échelle lors de l'instabilité de tourbillons intenses ou de courants côtiers, ainsi que leur contribution aux processus de mélange et de transfert d'énergie.

## • Le cycle de l'eau aux moyennes latitudes

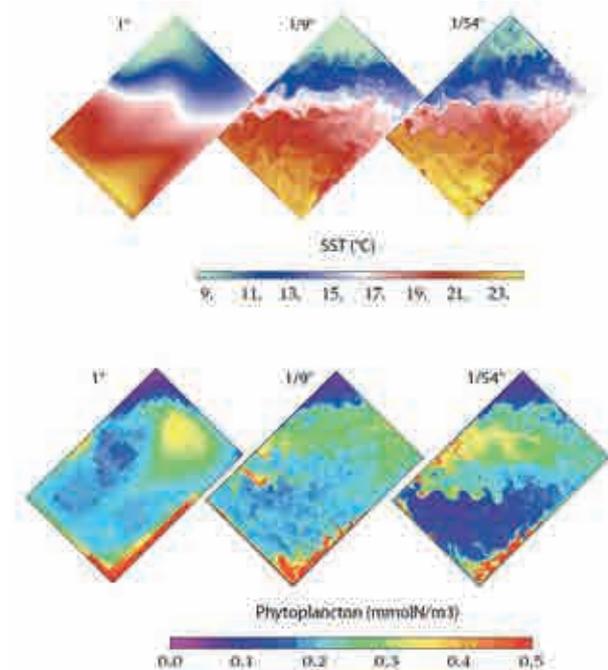
L'étude du cycle de l'eau dans le sud de la France a été poursuivie avec l'exploitation, en région Cévennes-Vivarais, des mesures régulières des précipitations et des estimations des champs d'humidité à moyenne échelle déduites des mesures GPS à l'aide d'une méthode innovante (VAPIMED). En 2007, une campagne associant observations au sol et aéroportées sur la région Vosges-Forêt Noire (COPS) a permis de caractériser les processus d'initiation de la convection et de son cycle de vie. Le développement de modèles intégrant ces nouvelles connaissances a ensuite permis d'obtenir une amélioration sensible de la capacité de prévision. Dans les Alpes, l'intérêt des nouveaux outils numériques, comme

la modélisation non-hydrostatique à haute résolution spatiale, pour la prévision des événements de précipitations intenses a été démontré (MAP D-phase).

## • Les couplages entre physique et biogéochimie dans l'océan

L'étude de la submésos-échelle océanique (5-50 km) s'est fortement développée dans plusieurs laboratoires français. Des travaux théoriques favorisés par une puissance de calcul accrue (supercalculateur Earth Simulator) permettant de simuler explicitement les processus de submésos-échelle océanique ont permis d'établir le fort impact de cette échelle sur les plus grandes échelles et sur les flux verticaux des traceurs. Ces processus jouent en effet un rôle important sur la dynamique de la couche de mélange et accélèrent la propagation de l'énergie cinétique du vent, de la surface vers l'océan profond. Des méthodes d'analyse ont été développées pour caractériser les structures filamenteuses de submésos-échelle à partir des mesures satellitaires, mettant en évidence le fort potentiel des futures missions altimétriques à haute résolution spatiale pour l'étude et la modélisation de ces phénomènes (par ex. mission SWOT).

Le rôle de la dynamique couplée physique – biogéochimie à submésos-échelle dans les échanges de matière et d'énergie entre les zones côtière et hauturière a été étudié grâce à plusieurs



*Le passage d'une basse résolution (1°) à une haute résolution (1/54°) a permis de révéler une grande complexité dans la répartition spatiale des températures de surface océaniques et dans la distribution du phytoplancton associé (chlorophylle). © CNRS/OCEAN*

campagnes en mer dans le golfe du Lion (LATEX). Une simulation numérique réaliste a permis de caractériser les tourbillons anticycloniques côtiers et de comprendre leur processus de formation : ils sont dus à un effet combiné de forçage par le vent et de stratification. Les données *in situ* ont par ailleurs montré que ces tourbillons étaient peu profonds et généralement elliptiques et que leur structure fine pouvait être décrite à l'aide de la théorie des exposants de Lyapunov.

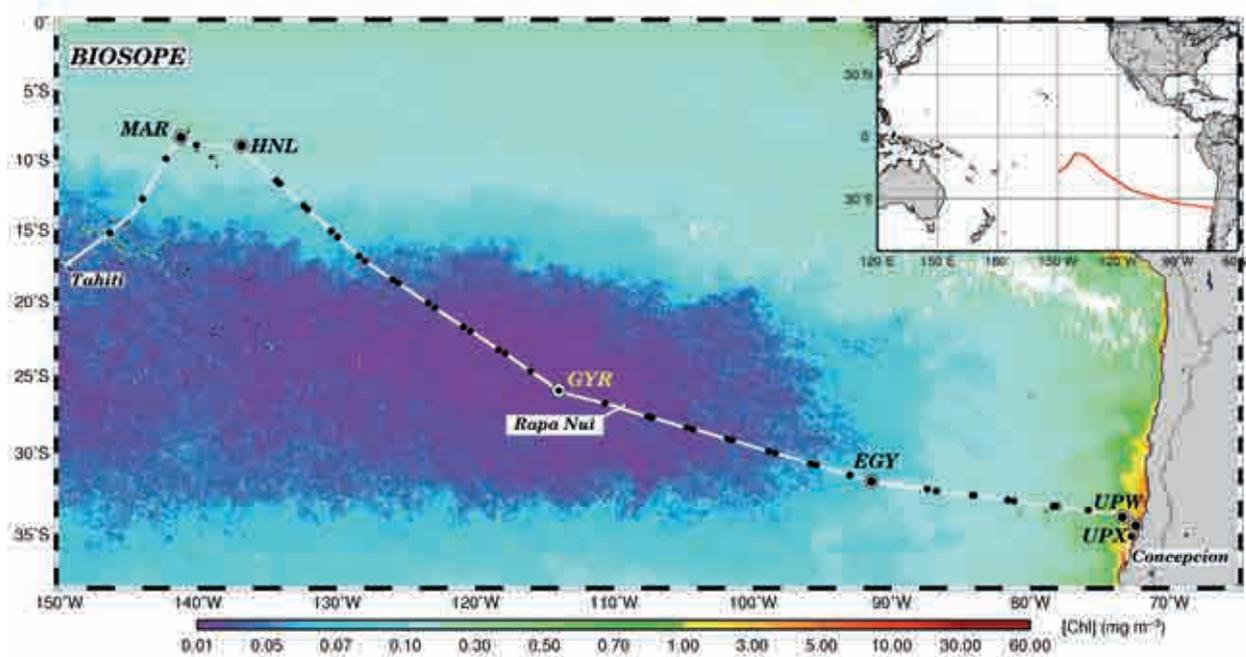
La mission BIOSOPE a permis d'explorer et de caractériser les propriétés biogéochimiques et bio-optiques des couches superficielles du gyre subtropical du Pacifique Sud, une zone peu échantillonnée. Cette zone est la plus désertique de l'océan global et les eaux y sont donc les plus transparentes. Les taux de fixation d'azote y sont les plus faibles au monde ainsi que les dépôts atmosphériques et les concentrations en fer. En réponse à ces conditions environnementales extrêmes (pénétration très profonde des rayons UV, stress nutritif), des niches écologiques uniques s'y sont développées. Avec la caractérisation de cette zone extrêmement oligotrophe, la communauté scientifique dispose désormais de références à l'heure où elle observe une extension spatiale des gyres subtropicaux oligotrophes (~ 40 % de la surface de l'océan dont l'origine (variabilité naturelle ou changement climatique) reste à déterminer.

## ■ La modélisation

### • Les modèles climatiques : MISSTERRE

Depuis de nombreuses années, la communauté internationale dont la communauté française s'attache à mieux évaluer et comprendre la dispersion des résultats des modèles de climat en réalisant des simulations selon un même protocole. Coordonné par le Programme mondial de recherche sur le climat (WCRP), ce travail alimente les rapports du GIEC.

Entre 2006 et 2010, le projet MISSTERRE a servi de cadre à différentes actions (projets européens, ANR) menées autour de la modélisation du climat et a permis de garantir une bonne répartition des efforts entre les différents acteurs français. Les travaux ont porté sur les paramétrisations et le couplage des modèles, le rôle majeur des nuages, l'incertitude sur l'évolution des précipitations, le rôle des rétroactions climat – carbone et la définition du nouvel exercice CMIP-5 en vue du prochain rapport du GIEC. Des paléoclimats aux climats récent et futur, l'éventail des simulations considérées est maintenant beaucoup plus large qu'auparavant.



Le programme BIOSOPE a permis de confirmer que le Pacifique Sud-Est est la zone la plus désertique au monde d'un point de vue biogéochimique (C, N, P, Fe). La teneur en phytoplancton est élevée près des côtes (rouge) et pratiquement nulle au centre de l'océan (bleu sombre). © CNRS/LOV

## • Le GIEC, prix Nobel de la Paix 2007

Une quinzaine de chercheurs de la communauté Océan Atmosphère participent activement aux travaux du GIEC, en particulier au groupe I qui traite des principes physiques du changement climatique. En France, ces recherches sont coordonnées par le programme LEFE. Avec le prix Nobel de la Paix attribué en 2007 conjointement à Al Gore et aux membres du GIEC, c'est l'expertise scientifique de la communauté du climat qui a été portée à la connaissance d'un large public.

## • La modélisation météorologique

La mise en service à Météo-France fin 2008 du modèle de prévision AROME représente une avancée majeure, en termes de qualité et de finesse des prévisions à courte échéance (24h), qui résulte de 15 ans de développement du modèle MESO-NH par la communauté atmosphérique française. Concernant l'interaction de l'atmosphère avec la surface continentale, les chercheurs ont développé un nouveau modèle communautaire des surfaces terrestres (SURFEX), qui regroupe l'ensemble des développements réalisés dans ce domaine durant les 20 dernières années et peut être couplé à des modèles atmosphériques divers.

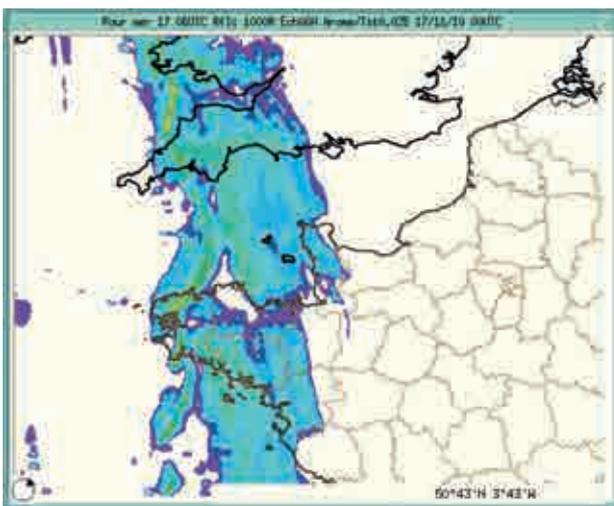
## • La modélisation en chimie atmosphérique

L'extension à la stratosphère du modèle de circulation générale atmosphérique LMDz a permis d'intégrer l'ozone stratosphérique dans les simulations climatiques. Cette nouvelle version de LMDz, ainsi que le modèle ARPEGE du CNRM, ont servi à établir la dernière évaluation de l'état de la couche d'ozone et sont utilisées pour le nouvel exercice du GIEC.

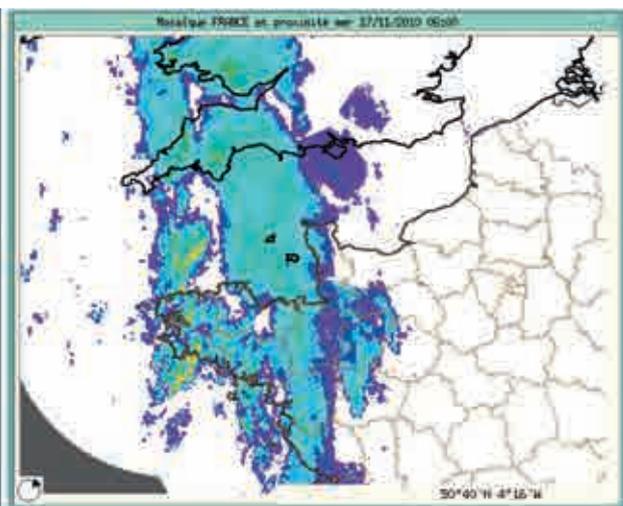
Les impacts directs ou indirects des aérosols atmosphériques sur le climat sont mieux compris depuis l'évaluation critique des premières simulations couplées aérosol – climat (GEOMON, AEROCOM, EUCAARI), lesquelles ont d'ailleurs été amplement utilisées dans l'élaboration du rapport du GIEC.

Il faut noter aussi des approches innovantes comme le système expert GECKO-A, qui permet d'auto-générer de façon totalement explicite les schémas chimiques d'oxydation des composés organiques.

Dans le cadre de GMES, un important effort d'évaluation, d'amélioration et d'opérationnalisation des modèles de chimie et de transport à l'échelle globale et régionale a été mené. Ces modèles, en particulier CHIMERE et MOCAGE, constituent aujourd'hui le noyau dur des futurs services opérationnels, coordonnés par le CEPMMT, de prévision de la composition chimique et de la qualité de l'air à courte et longue échéance.



Réfectivités calculées par AROME,  
après 6 heures de prévision



Réfectivités observées  
par le réseau radar de Météo-France

Les performances du modèle AROME sont illustrées par la prévision à six heures d'un champ de précipitations : les réfectivités calculées sont remarquablement semblables à l'observation par imagerie radar. © Météo-France/CNRM

## • La modélisation de la circulation océanique et des cycles biogéochimiques

Ces dernières années, l'augmentation des capacités de calcul a permis un saut de résolution très significatif dans les configurations globales (1/12°) et régionales (1/36°) du modèle NEMO. Les outils d'assimilation de données ont fait l'objet de progrès significatifs et des versions simplifiées de ces outils ont été développées pour des applications opérationnelles et la production de ré-analyses.

La plateforme NEMO de modélisation de l'océan s'est considérablement développée au cours des cinq dernières années, grâce à la création depuis 2008 d'un consortium européen et grâce au concours du projet DRAKKAR. Ce dernier a en effet permis de développer une hiérarchie (de résolution croissante) de modèles globaux d'océan couplés à des modèles de glace de mer et la configuration au 1/4° est désormais utilisée en prévision et pour l'étude de la variabilité océanique des dernières décennies. Des modèles couplés océan – atmosphère et océan – biogéochimie ont également été développés (BIONUTS et MERCATOR-VERT). Les résultats de ces modèles et de leurs configurations régionales ont permis de comprendre de multiples facettes de la variabilité océanique : les exportations d'eau douce de l'océan Arctique, les polynies de l'Antarctique, les ondes tropicales d'instabilité, les variations du contenu thermique du golfe de Gascogne et les échanges dans les détroits indonésiens. Le projet DRAKKAR a aussi permis des avancées dans d'autres disciplines, allant des mathématiques appliquées (modèles de dispersion turbulente) à la biologie (reconstruction de la trajectoire des larves d'anguilles en Atlantique Nord). Il a permis de concevoir et de distribuer largement des outils originaux pour la gestion, l'analyse et l'évaluation fine des simulations numériques.

Dans le domaine de la modélisation océanique côtière, une démarche nationale concertée concernant l'évolution de l'océanographie côtière a été initiée et un exercice d'intercomparaison de modèles dans le golfe de Gascogne a été organisé. Le couplage du modèle côtier SYMPHONIE avec des modèles de grande échelle (notamment NEMO-OPA) a fait l'objet de développements importants dont ont pu bénéficier les travaux portant sur les marées, les ondes internes et les transferts énergétiques associés, ainsi que sur les plongées d'eau dense en Méditerranée Nord-occidentale et sur les relations entre dynamique, transport sédimentaire, apports fluviaux et biogéochimie.

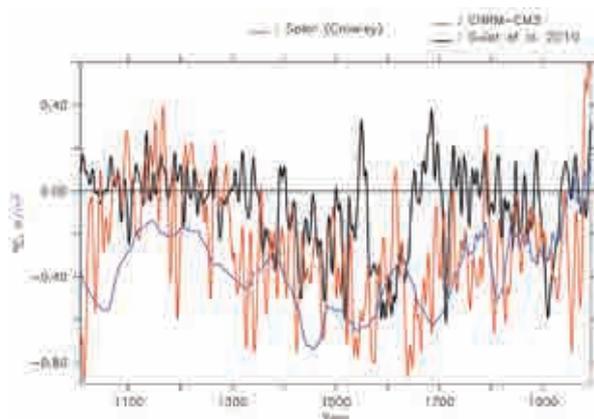
## • La modélisation des climats passés

### *La modélisation du climat durant les 2 000 dernières années*

Une reconstitution multiproxies (indicateurs des conditions passées) des climats européen et méditerranéen jusqu'à l'an 600 a permis de replacer le réchauffement des dernières décennies dans une perspective historique : il dépasse largement tout ce qui est survenu pendant l'optimum médiéval, que ce soit en tendance, en homogénéité spatiale et en variabilité des extrêmes. Il a aussi été possible de montrer que l'avancée des glaciers durant le petit âge de glace correspondait à une augmentation des précipitations hivernales, lesquelles avaient atteint à la fin de cette période un niveau supérieur de 25 % à celui des précipitations moyennes du XX<sup>e</sup> siècle (GLACIOCLIM).

Une approche combinant données de terrain et modélisation (ESCARCEL) a permis de montrer que le forçage solaire explique l'évolution climatique de la première moitié du millénaire et que l'augmentation des gaz à effet de serre explique le réchauffement du dernier siècle, mais que la grande variabilité climatique observée pendant la période intermédiaire (1500-1750) n'est pas liée à ces deux forçages et qu'il n'est donc pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de la modéliser correctement.

Les sciences humaines et sociales participent de plus en plus à ces recherches. Ainsi, les données phénologiques historiques (principalement les dates du début des vendanges) permettent désormais de produire des courbes fiables de variations de températures régionales sur le dernier millénaire (OPHELIE).



*Reconstitution de la température moyenne d'été en Europe au cours du dernier millénaire (courbe noire), comparaison avec les simulations du modèle du CNRM-CM3 (courbe rouge) et avec l'irradiance solaire calculée par Crowley (Science 2000) (courbe bleue). © CNRS/CEREGE/ECOREV*

## La modélisation du climat durant le dernier cycle climatique

Des approches pluridisciplinaires et des progrès méthodologiques importants ont permis d'améliorer la compréhension des proxies et donc la précision des reconstructions paléoclimatiques. Ainsi, de nouveaux traceurs de la température (Li/Mg), du pH (isotopes du B) et de la productivité de l'océan (P/Ca) ont pu être mis en œuvre à partir de coquilles carbonatées d'organismes marins (AMPOULE et EURO-TRACES).

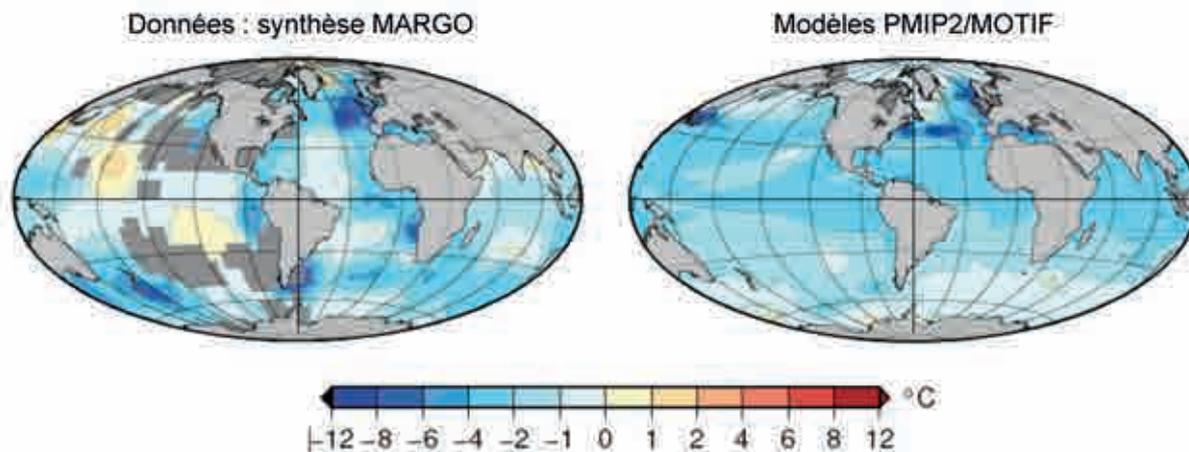
La confrontation des reconstructions paléoclimatiques avec des simulations climatiques issues de modèles de circulation générale océan – atmosphère sur des tranches de temps limitées et de modèles de complexité intermédiaire a permis de progresser dans la compréhension des rétroactions climat – carbone et climat – calottes sous différentes conditions de forçage climatique (ECHOS, RTN NICE, PAST4FUTURE, PICC, IDEGLACE). Des analyses géochimiques de sédiments de l'océan Indien Sud ont par exemple permis de reconstituer les échanges de masses d'eau entre les océans Indien et Atlantique lors des périodes les plus froides des grands cycles climatiques et de mettre en évidence une rétroaction climatique faisant intervenir la circulation thermohaline. Ces échanges de masses d'eau seraient en partie responsables de la modulation du climat au cours de ces périodes.

Parallèlement, la modélisation des variations de température et de précipitations à certaines périodes du dernier cycle glaciaire progresse. Cependant, si les précipitations simulées durant

l'événement d'Heinrich 4 (libération d'une grande quantité d'eau douce et d'icebergs dans l'Atlantique Nord il y a environ 40 000 ans) sont validées dans leurs grandes lignes par les études palynologiques, cela n'est pas encore le cas pour les températures aux basses latitudes (QUEST-DESIRE/ACER). De même, les températures de surface de la mer reconstituées par les modèles du projet MOTIF, lors du dernier maximum glaciaire (il y a  $\approx$  21 000 ans), sont en désaccord avec celles de la base de données multiparamètres MARGO : la plupart des modèles simulent en effet des refroidissements zonaux ou des gradients est-ouest inverses de ceux mis en évidence par les données. Ceci montre que des améliorations sont encore nécessaires pour que les modèles puissent reproduire des conditions climatiques très différentes de celles d'aujourd'hui.

Les carottages des récifs de Tahiti ont permis de reconstituer les phases transitoires de la remontée du niveau marin pendant les deux dernières déglaciations et donc de mieux contraindre les estimations de l'élévation actuelle du niveau des mers, notamment à travers la calibration des modèles d'ajustement glacio-isostatique (CHECREEF).

Enfin, l'analyse géochimique et micropaléontologique de carottes de sédiments du Pacifique équatorial Est et Ouest a permis de reconstruire les échanges de vapeur d'eau entre les océans Atlantique et Pacifique, la position de la zone de convergence intertropicale et le phénomène climatique ENSO au cours des derniers 90 000 ans (MISLOLA).



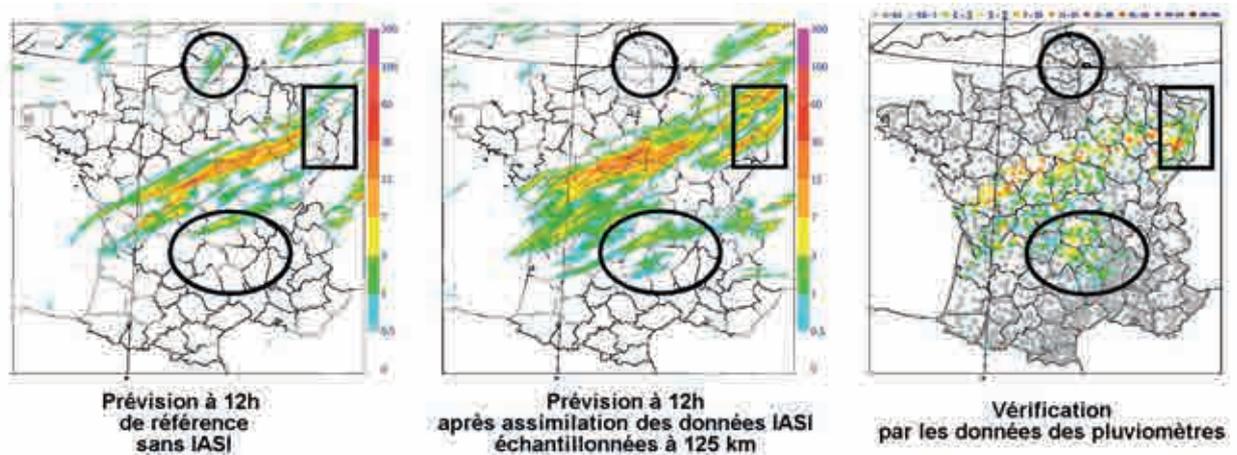
Différences de température de surface de l'océan durant l'hiver boréal (janvier-mars) entre le dernier maximum glaciaire (il y a 21 000 ans) et la période actuelle, reconstruites à partir des sédiments marins (projet MARGO) et simulées par les modèles couplés océan – atmosphère (modèle IPSL-CM4-V1-MR, projet PMIP2/MOTIF). © CNRS/LSCE

## ■ Les couplages modèles – observations : assimilation de données

Les nombreux projets en assimilation de données d'origines disciplinaires variées (LEFE/ASSIM) ont bénéficié du concours de mathématiciens. Ceux qui fédéraient de nombreuses équipes autour de l'évolution d'un outil commun ont contribué fortement à structurer cette communauté. C'est le cas par exemple du projet ADOMOCA d'assimilation de données spatiales de chimie atmosphérique dans des modèles globaux de chimie-transport pour l'étude du transport de polluants, de la qualité de l'air, des processus physicochimiques dans la haute troposphère - basse stratosphère et de l'ozone stratosphérique. C'est aussi le cas des projets (NEMOVAR, VODA...) qui ont permis à la communauté utilisatrice du système multi-incrémental d'assimilation variationnelle de données *in situ* et satellitaires pour le modèle d'océan OPA9/NEMO (NEMOVAR) de contribuer à faire de ce modèle un outil adapté à diverses applications en océanographie : océanographie opérationnelle, prévision méso-échelle, prévision du climat et ré-analyse océanique.

La comparaison des variations de la circulation océanique simulées par différents modèles contraints par des données *in situ* collectées depuis 1950 (RECO) a montré que le signal le plus robuste est le ralentissement, à partir de 1995, de la circulation thermohaline et du tourbillon subpolaire. Il a aussi été montré qu'en été, la dynamique de l'Atlantique tropical modifie la distribution des régimes de temps et donc la probabilité d'occurrence de vagues de chaleur sur l'Europe, et qu'en hiver l'océan Indien joue un rôle dans les phases de l'oscillation nord atlantique (ENSEMBLES, DYNAMITES, CHAMPION).

Enfin, la prévision des précipitations a été améliorée grâce à de nombreux développements méthodologiques qui permettent désormais l'assimilation de données de précipitations (radars) et de vapeur d'eau (satellite et GPS). L'assimilation des données GPS, très utiles pour détecter les biais, a été rendue possible par le développement de coopérations entre les communautés Atmosphère et Terre Solide.



L'assimilation des données IASI dans le modèle AROME a permis d'améliorer la prévision des précipitations. © Météo-France/CNRM

# Analyse des processus et flux aux interfaces

Les systèmes dynamiques (atmosphère, océan, cryosphère, biosphère, fonds océaniques...) évoluent en réponse aux transformations et transports internes à chaque milieu et aux échanges qui s'opèrent aux interfaces. Les interfaces sont définies ici comme les lieux caractérisés par de forts gradients - voire des discontinuités - de matière ou d'énergie, qu'ils soient situés entre les compartiments du Système Terre ou au sein de ces compartiments (document de prospective Océan Atmosphère, Lille, 2005).

## ■ L'interface continent – atmosphère

### • Les flux atmosphériques

L'avancée principale sur l'interface continent – atmosphère concerne l'étude des émissions et dépôts, qui sont des termes essentiels du bilan des espèces chimiques. De nouveaux développements analytiques couplés aux mesures de terrain pour la caractérisation des émissions et des dépôts ont permis d'étudier des sources peu connues (par ex. : nouvelles sources biogènes diurnes de HONO et source de NO<sub>x</sub> du manteau neigeux par photolyse du nitrate) et de mieux comprendre les cycles du soufre et de l'azote en lien en particulier avec la glace de mer ou le manteau neigeux en Antarctique.

Des progrès significatifs sur la quantification des émissions gazeuses ont été obtenus en affinant les facteurs d'émission (par exemple par une meilleure estimation des émissions de biomasse) et en développant de nouvelles méthodologies, ce qui a contribué à l'amélioration des cadastres d'émission.

Une meilleure caractérisation des sources des aérosols atmosphériques a été rendue possible grâce au couplage d'observations régulières (station du Puy de Dôme) et de nouveaux instruments de mesures embarqués sur l'avion ATR 42 (AMS communautaire).

Pour les gaz à effet de serre, un système d'inversion et d'assimilation a été développé pour estimer les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> à partir de mesures au sol, aéroportées ou spatiales. La mission spatiale japonaise GOSAT, lancée en 2009, permet aujourd'hui l'observation de ces gaz à l'échelle globale. Les équipes françaises ont été fortement impliquées dans cette mission : dans sa validation par des mesures ballons (CARBOEUROPE, IMMEC et ICOS), dans l'amélioration des bases de données spectroscopiques de référence qu'elle utilise

(GEISA et HITRAN) et dans l'assimilation de ses observations dans les modèles.

### • L'humidité des sols

Lancé en novembre 2009, le satellite SMOS est destiné notamment à la mesure de l'humidité des sols. Il a pour objectif la détermination des flux d'eau et d'énergie à l'interface continent – atmosphère pour le suivi climatique et les prévisions météorologiques. Des expériences utilisant des réseaux de mesures *in situ* (SWATMEX, SMOSMANIA) ont permis d'étalonner l'instrument SMOS, grâce à des campagnes ciblées menées par les avions de l'UMS SAFIRE équipés du simulateur aéroporté CAROLS, et de construire les outils d'assimilation de données nécessaires.

### • La couche limite en météorologie dynamique

Des études fondamentales sur les écoulements en présence de relief ont été menées à bien, afin de développer des paramétrisations de la turbulence au sein de ces écoulements, d'analyser la génération des ondes et de décrire les vents catabatiques. Des programmes plus appliqués comme l'étude des bilans d'énergie dans l'atmosphère urbaine (CAPITOUL, PARIFOG) ont permis d'améliorer la prévision des épisodes de brouillards ou encore la prévision de la dispersion des cendres volcaniques (Île de la Réunion).

## ■ L'interface continent – océan

### • Les flux biogéochimiques aux interfaces du continuum terre – mer

En milieux lagunaires ou côtiers, des progrès notables ont été obtenus sur la détermination des cinétiques de biodégradation et de photodégradation et sur la nature des produits résultant

de cette dégradation. Les principales espèces bactériennes impliquées dans la biodégradation des pesticides présents dans les milieux méditerranéens ont été identifiées.

Un nouvel algorithme permettant de détecter la présence de blooms phytoplanctoniques à partir de l'analyse d'images satellitaires a été appliqué au système lacustre de la plaine d'inondation amazonienne, la Várzea de Curuai, pour analyser la dynamique spatiale et pluriannuelle du phytoplancton.

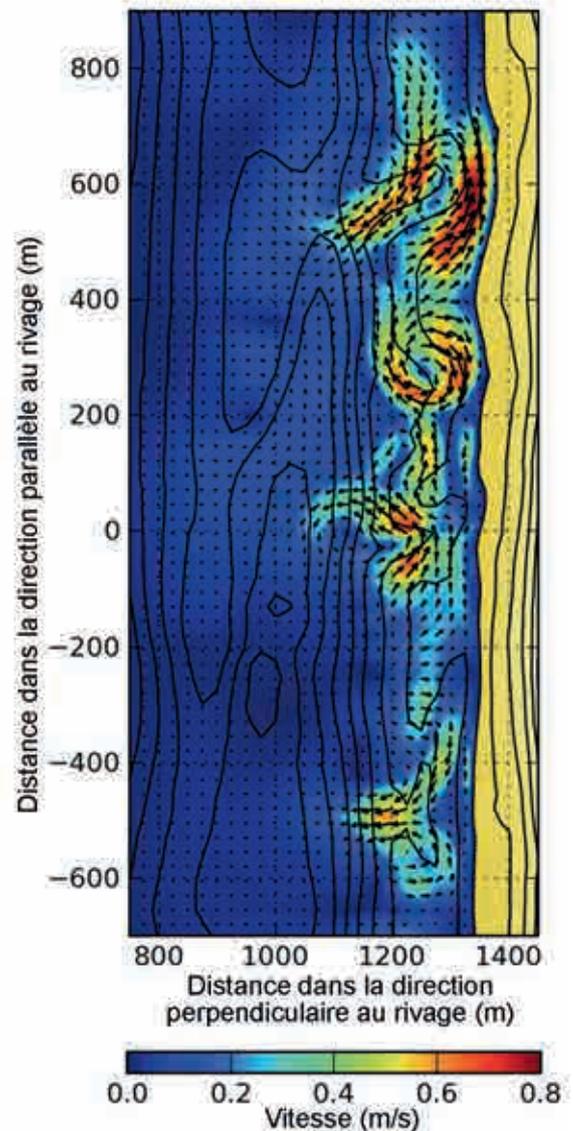
La modélisation précise de la marée barotrope, menée au niveau de l'estuaire de l'Amazone sur la base de développements en modélisation et d'une bathymétrie précise obtenue en combinant données spatiales et *in situ* (AMANDES), a ouvert la voie à une quantification du transport de matière par le fleuve Amazone et de ses échanges avec l'océan.

En Méditerranée, les impacts du changement global sur le débit des fleuves ont été quantifiés : ainsi, de 1965 à 2004, une baisse de 20 % du débit des fleuves se jetant dans le golfe du Lion a été observée (Observatoire ORME). Une projection sur la période 2071-2100 laisse entrevoir par exemple une réduction supplémentaire du débit de l'Hérault pouvant atteindre 50 %.

Plusieurs projets interdisciplinaires nationaux (BIOPRHOPI, CHACCRA et EXTREMA) et européens (EUROSTRATAFORM, HERMES et HERMIONE) se sont attachés à comprendre le rôle des multiples processus mis en jeu dans le devenir des apports fluviaux du bassin versant au plateau continental puis aux zones profondes des bassins. Ainsi, il s'avère que les fortes houles générées par les coups de vent marin et les courants de fond intenses associés à la propagation des eaux denses ont un rôle prépondérant sur la remise en suspension et le transport des sédiments cohésifs du plateau du golfe du Lion.

## • La dynamique littorale

Plusieurs projets (MODLIT, ALCINOOS, HYDRODYNAMIQUE DU DÉFERLEMENT, ECORS) ont permis des avancées significatives dans le domaine de la modélisation de la circulation induite par les vagues et leur déferlement en milieu littoral. Dans ces environnements très énergétiques, il a été montré que la morphologie des fonds sédimentaires évolue très rapidement. La compréhension et la modélisation des interactions complexes qui contrôlent la formation et l'évolution des corps sédimentaires littoraux soumis à l'action de la houle ont progressé. En associant la modélisation (théorique et numérique) à l'observation (*in situ* et par télédétection), un nouveau mécanisme de couplage morphodynamique qui se superpose au mécanisme « classique » d'auto-organisation a été identifié. Ces travaux contribuent au développement de modèles performants pour décrire l'évolution morphologique des littoraux sableux.

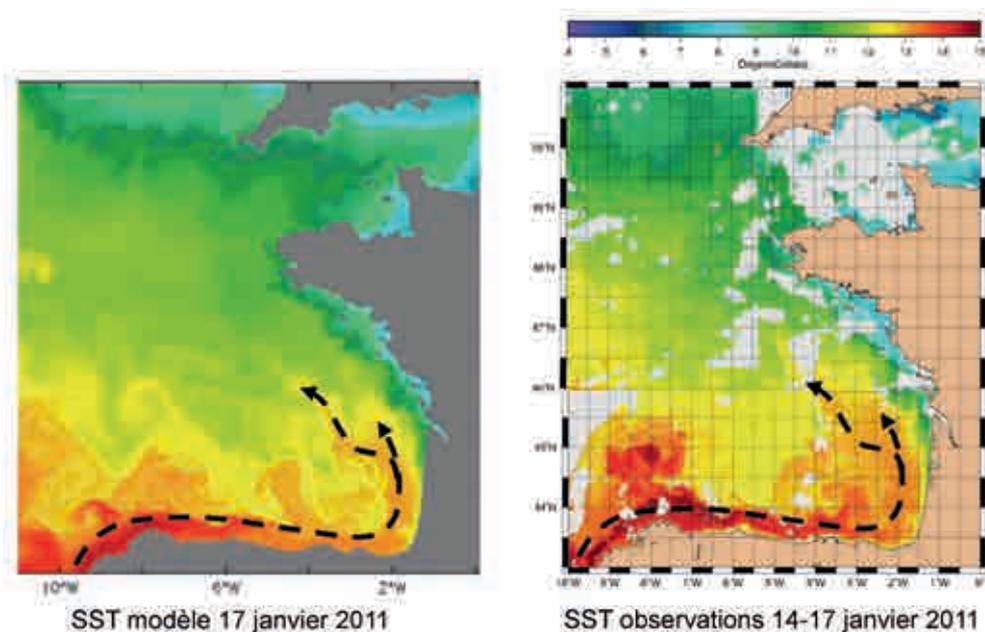


Modélisation des mouvements des masses d'eau dans la zone de surf littorale. © CNRS/EPOC

## • Les échanges océan côtier – océan hauturier

D'une manière générale, l'accent mis ces dernières années sur la thématique des échanges entre la côte et le large s'est accompagné d'importantes améliorations des outils, notamment des modèles d'océanographie côtière, du traitement des mesures altimétriques près des côtes et des mesures des courants côtiers par systèmes radar.

La connaissance de la dynamique des régions côtières du golfe de Gascogne a progressé et leurs représentations numériques ont été améliorées (EPIGRAM). Les premières retombées concernent une meilleure compréhension et une meilleure



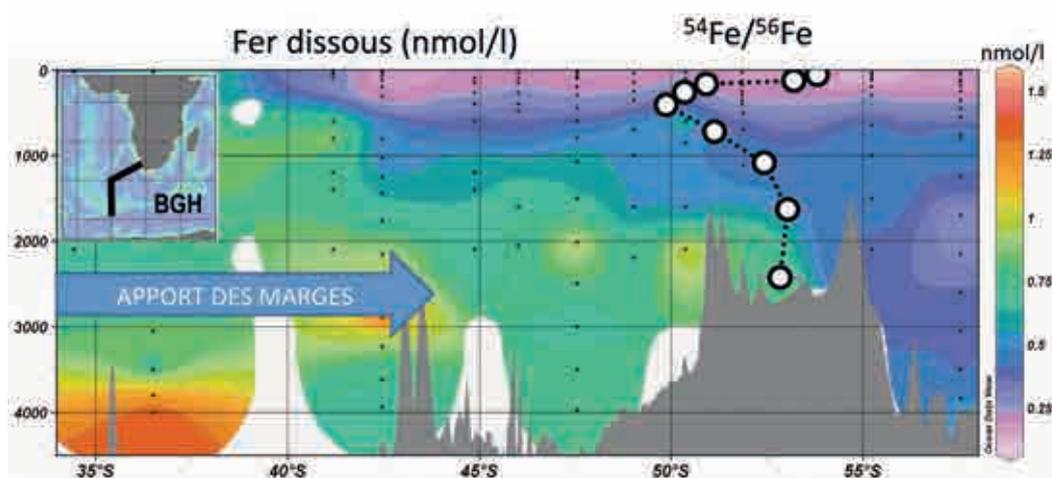
Propagation d'anomalies chaudes des températures de surface de l'océan (SST) lors d'un épisode de « Navidad » dans le golfe de Gascogne : comparaison d'une simulation numérique (EPICRAM) avec les données observées par le satellite METOP2. © CNRS/LPO

modélisation de la marée interne et de l'effet des vagues sur la couche de mélange et les courants littoraux, ainsi que la réalisation d'atlas de courants sur la zone. De plus, dans le golfe de Gascogne, les modèles sont désormais capables de simuler avec une grande justesse les « épisodes Navidad » (pénétration d'eaux chaudes venant du sud le long du talus puis reflux vers le large).

Les upwellings des bords est-océaniques ont été étudiés dans les quatre principales régions concernées (Californie,

Humboldt, Canaries et Benguela) et des différences notables de taille et de structure dans les flux entre la côte et le large ont pu être mis en évidence (INTERUP).

Enfin, l'analyse de la répartition spatiale de la composition isotopique du fer ( $^{54}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ ) a permis de mieux préciser les sources et d'affiner les processus de libération de cet élément dissous au sein de la colonne d'eau, ainsi que de mettre en évidence l'importance des apports en fer depuis les marges, lesquels s'ajoutent aux apports par les fleuves et les aérosols.



Apport de fer à l'océan hauturier (concentration et composition isotopique), par advection depuis les marges continentales : exemple de l'Atlantique sud. Une diminution du fer dissous (DFe) est observée du nord vers le sud de la section. Les plus fortes valeurs de DFe s'observent dans les eaux de surface subtropicales du fait de la présence de masses d'eau originaires de l'océan Indien et ayant été en contact avec la marge continentale africaine. © CNRS/LEGOS

# Étude des impacts des changements globaux

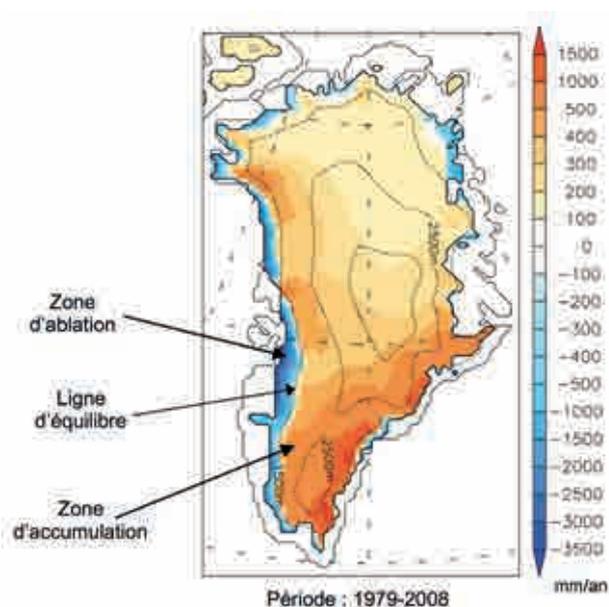
Les impacts des changements globaux sur les différents compartiments du Système Terre sont maintenant mieux caractérisés. Des percées ont été réalisées particulièrement en ce qui concerne l'évolution des eaux de surface océaniques (par ex. : température, salinité, élévation du niveau moyen, contenu en sels nutritifs et métaux), l'évolution des calottes de glace et l'évolution du CO<sub>2</sub> océanique et atmosphérique.

## ■ Les températures et salinités des eaux de surface océaniques

L'extension des séries temporelles de température et salinité de surface acquises à partir de navires de commerce a permis de caractériser les variabilités interannuelle et décennale, ainsi que les tendances climatiques de ces paramètres (Service d'observation SSS). Depuis 1955, la masse d'eau chaude et dessalée présente dans l'ouest du Pacifique tropical, siège du phénomène El Niño, s'est significativement réchauffée et dessalée, tandis que le front de salinité situé à l'équateur présente une extension notable vers l'est, en accord avec les modifications attendues du changement global. Des études de processus ont montré que des structures halines particulières (barrière de sel) étaient quasi permanentes au niveau du front équatorial et jouaient un rôle majeur sur le déroulement du phénomène El Niño. En Atlantique Nord (SSS, OVIDE), les caractéristiques des masses d'eau du tourbillon subpolaire ont été analysées à l'aide des mesures disponibles depuis les années 1900. Elles présentent des tendances relativement faibles mais une variabilité multidécennale importante. La tendance la plus significative est une diminution de la densité à la surface de l'océan, ce qui peut avoir un impact sur la convection profonde.

## ■ Les calottes de glace

La modélisation de la calotte groenlandaise (MAR) a permis de cartographier les zones d'accumulation et d'ablation. Le bilan global montre que l'ablation domine. L'évolution des calottes polaires (Groenland et Antarctique) n'avait pas (ou très mal) été prise en compte dans les modèles lors du dernier GIEC (2007). Depuis lors, le projet MISSTERRE a montré qu'au cours des prochains siècles, le flux d'eau douce provenant de la fonte de la calotte groenlandaise affaiblira la circulation thermohaline en Atlantique Nord et modifiera le climat en Europe. Il a par ailleurs été montré que la fonte de la calotte groenlandaise pourrait être irréversible au-delà d'un seuil d'émission de CO<sub>2</sub> cumulée depuis



Modélisation de la moyenne annuelle de l'accumulation (en rouge) ou de l'ablation (en bleu) de la calotte du Groenland sur la période 1979-2008. © CNRS/LGGE

le début de l'ère industrielle de 3 000 GtC (CASTOR). Il est donc clair qu'une topographie de référence de l'Antarctique (et des glaciers arctiques) focalisée sur les bords des calottes (SPIRIT) est une donnée indispensable pour quantifier les changements futurs et leurs impacts sur le niveau des mers.

## ■ Le niveau des océans

L'élévation du niveau global des océans a été évaluée à  $3,3 \pm 0,4$  mm/an, grâce à un suivi satellitaire continu depuis une vingtaine d'années (TOPEX/POSEIDON, JASON). Une première utilisation des mesures Argo a permis d'évaluer la contribution de l'effet stérique (augmentation du volume des océans résultant des changements de température et salinité) à la montée globale des océans. Sur la période 2003-2008, la contribution stérique

a diminué par rapport aux années précédentes : aujourd'hui elle ne représente plus qu'un tiers de l'élévation moyenne contre 50 % entre 1993 et 2003. Cette diminution s'explique par une fonte accélérée des glaces continentales.

## ■ Le cycle du CO<sub>2</sub>

L'analyse des observations du Service d'observation OISO (Indien Sud) sur la période 1991-2007 a permis de montrer une réduction du puits de CO<sub>2</sub> océanique dans cette région et sans doute sur l'ensemble de l'océan Austral (FLAMENCO2). Outre l'intégration de ces résultats dans l'évaluation du bilan de carbone planétaire et de son évolution depuis plusieurs décennies, ces observations ont également permis de valider des simulations couplées climat – carbone. Celles-ci suggèrent que la diminution de l'ozone stratosphérique dans les hautes latitudes sud a causé une augmentation des vents, provoquant un brassage des eaux océaniques de surface avec les eaux plus profondes, riches en CO<sub>2</sub>, et limitant ainsi le pompage du carbone atmosphérique par les eaux de surface.

Lancé en 2008 et dévolu à l'étude de l'acidification de l'océan, le projet européen EPOCA a permis d'établir que les océans ont actuellement un pH moyen de 8.1 et qu'ils sont donc plus acides qu'au moment de la révolution industrielle où leur pH était de 8.2. Une reconstruction à l'échelle saisonnière du pH au XX<sup>e</sup> siècle, à partir de mesures effectuées dans les coraux des îles Fidji, a permis de démontrer que le bore et ses isotopes sont des proxies prometteurs du pH passé de l'eau de mer (PHARE).

## ■ La régionalisation du changement climatique

La régionalisation du changement climatique, c'est-à-dire l'extrapolation au niveau régional des simulations globales (descente d'échelle), est devenue un enjeu majeur ces dernières années. Les études menées dans ce domaine ont d'abord permis des avancées méthodologiques. Ainsi, l'analyse de simulations du climat actuel en région méditerranéenne à différentes résolutions a montré que l'utilisation de la haute résolution (une dizaine de km) améliorerait la simulation du bilan d'eau douce de la mer Méditerranée, des extrêmes de précipitation et des vents près des surfaces continentales ou en régions côtières. De nouveaux

modèles ou techniques de régionalisation dynamique ont par ailleurs été développés et mis en œuvre. Citons par exemple le pilotage des modèles globaux zoomés (LMDz et ARPEGE-climat), une technique de « two-way nesting » entre versions régionale et globale (LMDz), le nouveau modèle à aire limitée ALADIN-climat, les premiers modèles du système climatique régional méditerranéen couplant l'atmosphère, les surfaces continentales, les fleuves, la mer Méditerranée et l'océan global (MORCE-MED). Une technique de correction des spectres de distribution des variables simulées permettant d'accéder à une meilleure représentation des événements extrêmes (méthode quantile-quantile) a également été mise au point. Enfin, de nouvelles méthodes fondées sur l'analyse des régimes de temps et la mise en œuvre de modèles statistiques multivariés ont permis de produire des projections climatiques jusqu'à l'échelle des bassins versants.

Ces nouveaux modèles et techniques de régionalisation ont permis d'explorer de nouvelles questions scientifiques. Il a ainsi été démontré, dans le cadre du projet MORCE-MED de mise au point d'une plateforme de modélisation régionale centrée sur le bassin méditerranéen, que si les couplages entre compartiments du Système Terre n'induisent pas de modifications sensibles de la variabilité climatique globale, ils ont un impact significatif sur les bilans hydriques et thermiques de la mer Méditerranée. Ces modèles et techniques ont aussi permis la réalisation de la première simulation régionale couplée du changement climatique sur le domaine méditerranéen, puis la réalisation d'ensembles de simulations régionales couplées multimodèles au niveau européen (CIRCE). Pour la première fois, des études d'estimation de probabilités de changement climatique à l'échelle régionale ont aussi pu être menées avec des résolutions de l'ordre de 25 km sur l'Europe, grâce aux ensembles de simulations multimodèles générés par le projet ENSEMBLES. D'autres ensembles de simulations de scénarios climatiques régionalisés, servant d'entrée à des études d'impact du changement climatique (sur la végétation, l'hydrologie...), ont été réalisés dans le cadre de projets nationaux (MEDUP, CLIMATOR, REXHYSS...) ou internationaux (CECILIA, CLAVIER...). Dans certains de ces projets, les techniques statistiques de désagrégation d'échelle ont permis d'élargir l'exploration du domaine d'incertitude en tirant parti de l'ensemble des simulations CMIP3, et les simulations climatiques régionales multimodèles ont permis d'évaluer les principales sources d'incertitude (variabilité climatique, scénarios d'émission, modèles globaux, modèles régionaux).

# Les chantiers régionaux

## ■ L'Afrique de l'Ouest

AMMA (Analyses multidisciplinaires de la mousson africaine) est un programme international pluridisciplinaire lancé pour comprendre les raisons des perturbations de la mousson africaine, notamment de la sécheresse qui a frappé sans discontinuer toute l'Afrique de l'Ouest au cours du dernier tiers du XX<sup>e</sup> siècle. Cette anomalie climatique est la plus importante que notre planète ait connue depuis qu'il existe une veille météorologique mondiale, que ce soit par sa durée, son extension spatiale ou encore sa sévérité (50 % de déficit pluviométrique moyen pendant 30 ans d'affilée sur la partie nord du Sahel).

Initié et piloté par la communauté française, AMMA s'intéresse à la physique du système de mousson et notamment aux interactions complexes entre les compartiments atmosphérique, continental et océanique, lesquelles déterminent sa variabilité sur des échelles allant de la dizaine de jours à la dizaine d'années. AMMA a permis de réaliser des observations remarquables autour de certains processus ou objets clefs tels que : la formation de la langue d'eau froide dans le golfe de Guinée, la dépression thermique saharienne, les injections stratosphériques associées aux systèmes convectifs, les transports et dépôts d'aérosols, les mécanismes d'alimentation des aquifères et le rôle de la végétation dans les reprises évaporatoires des eaux situées en profondeur dans le sol. Les grands cycles (eau, carbone, éléments chimiques) ont également fait l'objet d'une attention particulière. Depuis 2008, suite aux campagnes de mesures intensives, un suivi de long terme a été mis en place afin d'assurer une documentation sur plusieurs années de la variabilité interannuelle des différents compartiments jouant un rôle dans le système de mousson, l'objectif à terme étant de développer un modèle de prévision de la mousson africaine.

Outre le financement français, AMMA a bénéficié d'un soutien important de l'Europe et de dotations nationales (notamment Royaume-Uni, États-Unis, Allemagne). Une structure de pilotage et de financement spécifique, sous forme d'une Action programmée internationale et d'un Conseil scientifique international, a permis une excellente coordination entre les organismes impliqués, une programmation optimisée des moyens et beaucoup d'efficacité et de transparence dans la gestion des financements.

### ● Le domaine météorologique

Des avancées importantes ont été obtenues sur le bilan de l'eau à micro- et méso-échelle en Afrique de l'Ouest, sur la dynamique atmosphérique de la région et sur les processus influant sur

le déclenchement de son système de mousson, notamment sa sensibilité aux conditions de forçage en surface comme la variabilité intrasaisonnière à l'interface océan – atmosphère dans le golfe de Guinée.

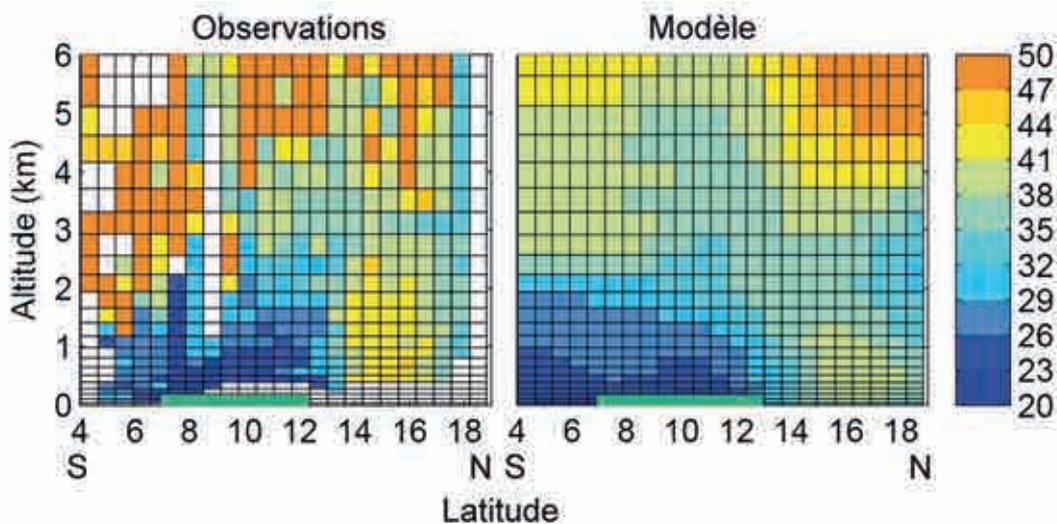
L'exploitation combinée des données d'AMMA et de celles fournies par la veille météorologique mondiale a permis d'identifier des mécanismes qui connectent ce système de mousson à l'Atlantique, à la mousson indienne, ainsi qu'à la Méditerranée et aux latitudes moyennes. Ces mécanismes jouent un rôle dans la variabilité climatique intrasaisonnière et interannuelle. Les bassins atlantique et indien jouent également un rôle dans la variabilité climatique décennale avec un effet sur la pluviométrie associée à cette mousson.

L'analyse des sorties de plusieurs modèles globaux opérant avec des températures de surface prescrites dans le cadre du projet ALMIP et leur comparaison entre les observations de flux par le réseau sol AMMA-CATCH a montré une grande dispersion entre modèles et des écarts importants entre modèles et observations, même pour la période située avant l'installation de la mousson et l'arrivée de la pluie. Ces écarts, qui sont à mettre en relation avec la dispersion des scénarios climatiques sur cette région du monde, proviennent en particulier d'une mauvaise représentation de la surface (effet de l'albédo notamment) mais aussi des aérosols et des nuages. ALMIP a permis de comparer différents schémas de surface et de démontrer l'aptitude des modèles de surface actuels à simuler l'humidité des couches superficielles, dès lors que les forçages observés sont prescrits. En revanche, les premières comparaisons données / modèles de flux confirment une mauvaise représentation de l'albédo. Enfin, l'effort sans précédent réalisé pour améliorer la qualité des radiosondages sur l'Afrique de l'Ouest a permis de mettre en lumière des biais importants aux amplitudes inattendues dans les modèles numériques de prévision du temps.

Ces différents résultats et l'effort spécifique réalisé pour améliorer les méthodes de prévision ont débouché sur de nouveaux diagnostics dont la maîtrise a été transférée aux prévisionnistes africains à travers différentes sessions de formation.

### ● La chimie de l'atmosphère tropicale

AMMA a clairement permis de démontrer au plan européen l'expertise nationale en chimie de l'atmosphère tant au niveau de l'expérimentation que de la synergie entre modèles et mesures. Les travaux ont apporté des informations sur les processus qui impactent la composition chimique de la « Tropical tropopause layer », notamment la formation d'ozone dans les panaches des



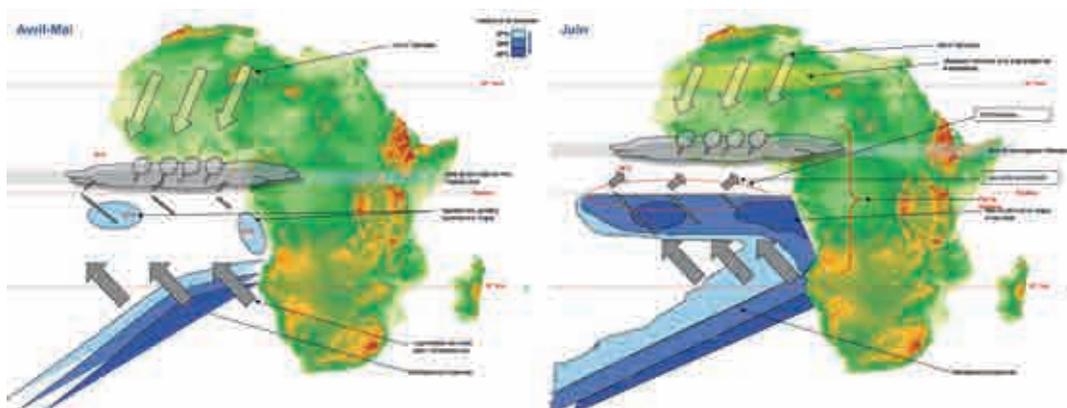
Distribution de l'ozone au-dessus de l'Afrique de l'Ouest : comparaison des mesures in situ obtenues à partir d'avions, avec une simulation numérique. Le trait vert horizontal représente la forêt équatoriale qui agit comme un puits pour l'ozone. L'échelle de couleur représente les concentrations en ozone (en ppbv). © CNRS/LATMOS

sources locales et des feux de biomasse des zones tropicales et sur l'impact du transport (convection locale et transport longue distance) et des NOx produits par les éclairs. AMMA a également permis une meilleure compréhension de la dynamique des aérosols, notamment désertiques, et de leur rôle sur la chimie et la microphysique des nuages. En particulier, des progrès importants ont été faits en ce qui concerne la modélisation de leurs émissions, leur caractérisation physique et optique en fonction de leurs conditions d'émission et le rôle des noyaux de condensation des mélanges aérosols carbonés et terrigènes.

### • La variabilité saisonnière dans l'océan tropical Atlantique

L'exploitation du volet océanique d'AMMA a permis une description de la variabilité saisonnière et interannuelle des couches hautes

de l'océan Atlantique et une meilleure compréhension de leur couplage avec l'atmosphère. Les campagnes de 2005 et 2006 se sont déroulées dans des conditions différentes, avec une mise en place très tardive de la mousson en 2006. L'analyse des données de ces campagnes a permis de montrer qu'avant le déclenchement des pluies de mousson, une « langue d'eau froide » se met en place au niveau du golfe de Guinée et que l'arrivée tardive de la mousson est liée à un décalage temporel et à une intensité moindre de cette langue d'eau froide dont les fluctuations d'intensité sont en partie conditionnées par celles des alizés de l'hémisphère sud. Un couplage avec rétroaction entre l'océan et l'atmosphère a également été mis en évidence : le renforcement des alizés induit une remontée de la « langue d'eau froide », laquelle provoque en retour un renforcement des vents de mousson au nord de 2°N, soit plus d'humidité et donc de pluie sur le continent (et inversement).



Interaction air – mer en Atlantique équatorial : d'avril-mai (à gauche) à juin (à droite), l'accélération des vents dans l'hémisphère sud crée une langue d'eau froide dans le golfe de Guinée qui précède le déclenchement des pluies de mousson. © CNRS/LATMOS

## • Le cycle de l'eau

Au-delà des résultats concernant spécifiquement le champ disciplinaire Océan Atmosphère, de nombreuses études ont été menées dans les domaines de l'hydrologie, du couplage du cycle de l'eau en surface avec la dynamique de la végétation et des liens entre eau de surface et eau souterraine. La variabilité des pluies associées aux fluctuations de la mousson est bien mieux comprise, ainsi que les implications immédiates sur la ressource en eau, les rendements agricoles et la santé.

## ■ Les régions polaires

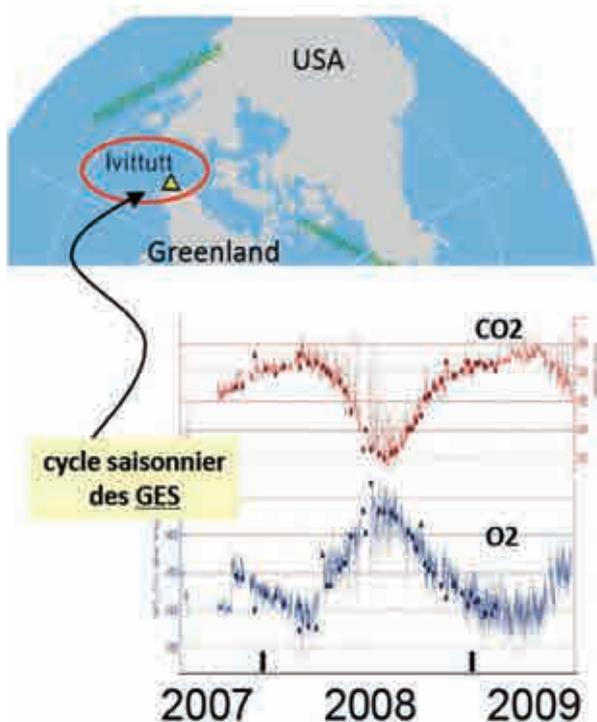
De nombreux chercheurs de la communauté Océan Atmosphère ont participé aux programmes internationaux mis en place à l'occasion de l'Année polaire internationale (API) 2007-2009, parfois en tant que coordinateurs (DAMOCLES, Concordia, POLARCAT).

## • La composition des atmosphères polaires

En Arctique, le transport depuis les moyennes latitudes des espèces à courte durée de vie influençant le climat (ozone,

aérosols) a été documenté et les principales zones sources, notamment la contribution non négligeable du continent asiatique, ont été identifiées (feux de biomasse en Sibérie : POLARCAT). L'importance des échanges entre l'atmosphère et le manteau neigeux pour le bilan de nombreuses espèces réactives contrôlant la chimie de l'atmosphère a été mise en évidence (OASIS). En plus de ces études de processus, les mesures effectuées à la station permanente d'Ivittut (Groenland) ont permis de caractériser les cycles saisonniers des gaz à effet de serre. La destruction d'ozone stratosphérique au printemps polaire en Arctique a été quantifiée et les différences avec les processus présents en Antarctique ont été précisées (ORACLE-03).

En régions polaires (Antarctique et Arctique), l'utilisation d'une approche isotopique ( $^{17}\text{O}$  et  $^{15}\text{N}$ ) a permis la réalisation de progrès importants dans l'étude de la capacité oxydante des atmosphères polaires, lesquelles sont très atypiques en raison de la présence de composés bromés et de très fortes teneurs en OH dues à la production de  $\text{NO}_x$  par le manteau neigeux, et de son impact sur certains grands cycles biogéochimiques (S, N, Hg...). Par ailleurs, le développement d'un nouvel instrument de mesure a permis de progresser sur la physique et la chimie de la neige, en particulier en ce qui concerne sa surface spécifique. Enfin, un événement important pour ces études en régions polaires a été l'ouverture en 2005 de la station permanente Concordia de l'IPEV sur le plateau Antarctique où des mesures des composés soufrés et d'isotopes de la vapeur d'eau ont été mises en œuvre (Service d'observation CESOA).



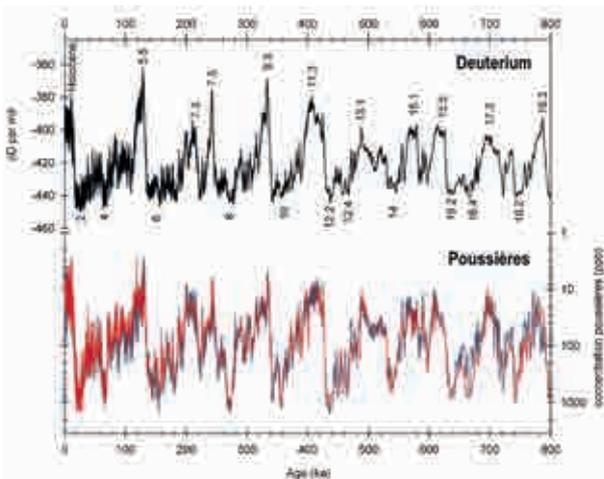
La station permanente d'Ivittut permet de mesurer en continu les variations saisonnières des gaz à effet de serre en Arctique (ici le  $\text{CO}_2$ ).  
© CNRS/LSCE

## • La banquise arctique et la calotte groenlandaise

Des observations spatiales et *in situ*, complétées par de la modélisation, ont révélé une forte augmentation de la vitesse de dérive de la glace de mer et de sa déformation interne depuis 30 ans (DAMOCLES). Un recul spectaculaire de la banquise en fin d'été a été mis en évidence en 2007. Un pôle de recherche sur le bilan de masse des calottes de glace en lien avec les variations climatiques a été créé. Des travaux fondés sur la télédétection spatiale ont conduit à réviser à la hausse les estimations de fonte de la calotte groenlandaise.

## • Les forages de glace et les climats passés

L'analyse des forages glaciaires EPICA en Antarctique s'est concrétisée par la publication avec l'Université de Berne de nouvelles courbes de référence de l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) au cours des 800 000 dernières années. Il apparaît que les teneurs en  $\text{CO}_2$  évoluent entre 180 et



Le projet européen EPICA (forage glaciaire) a permis de reconstituer  $\approx 800\ 000$  ans d'archives climatiques. Les paléo-températures atmosphériques sont désormais reconstruites sur huit cycles climatiques grâce au proxy deutérium. Les concentrations en poussières désertiques révèlent un accroissement systématique (facteur 20 à 30) durant les périodes glaciaires. © CNRS/LGGE/LSCF

280 ppm durant cette longue période préindustrielle, valeurs à comparer aux 390 ppm désormais atteints.

Les données du forage de Berkner ont conduit à réduire de plusieurs mètres l'estimation de la contribution de l'Antarctique aux variations du niveau des mers au cours des transitions glaciaire-interglaciaire.

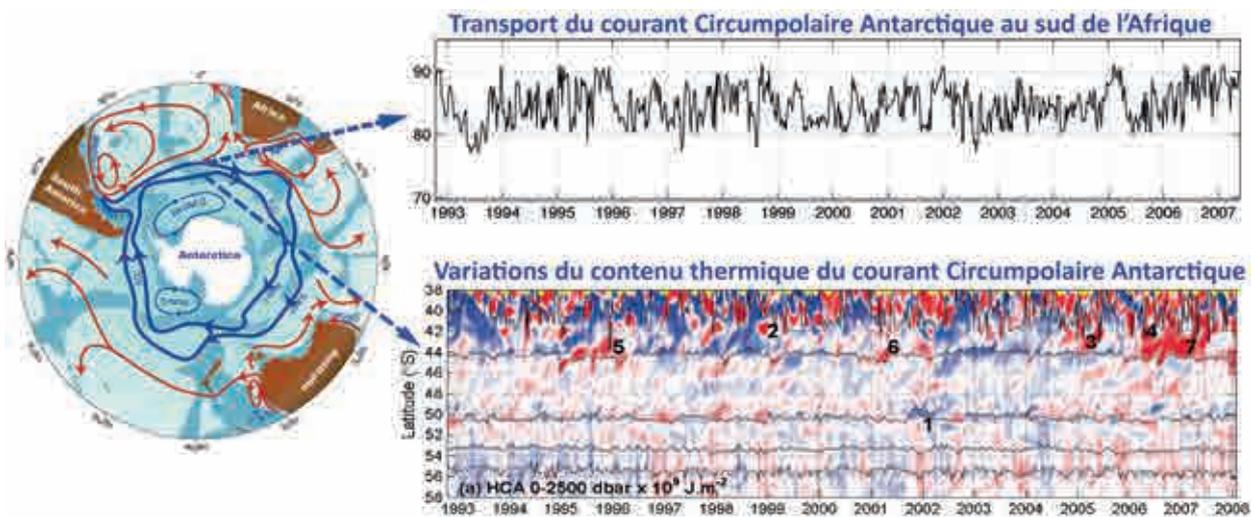
Le forage Talos Dôme a montré que les variations climatiques durant les événements rapides Dansgaard/Oeschger et durant la dernière déglaciation dans le secteur de la mer de Ross s'expliquent, comme pour l'Antarctique de l'Est, par le mécanisme de bascule bipolaire entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud par l'intermédiaire de la circulation thermohaline.

Un résultat majeur obtenu dans le cadre du projet TASTE-IDEA est la toute première obtention, pour les soixante dernières années, d'une corrélation claire entre l'activité solaire, et son cycle à 11 ans, et les concentrations en  $^{10}\text{Be}$  déposé dans la neige à Vostok et Dôme C.

Au Groenland, le forage profond NEEM (cadre international IPICS) au nord-ouest de la calotte, terminé lors de l'été 2010, donne désormais accès aux enregistrements tant attendus du climat de l'Éémien (*i.e.* le dernier interglaciaire).

## • L'océanographie des régions subpolaires

La variabilité de la « cellule de retournement » atlantique est désormais mieux comprise. Suivant en cela les recommandations du programme CLIVAR, les équipes françaises ont apporté une contribution importante au suivi de la circulation thermohaline atlantique, par la réalisation de « sections » d'hydrologie / géochimie répétées en zone subarctique (OVIDE), aux frontières sud de cet océan dans le passage de Drake (DRAKE) ainsi qu'au sud de l'Afrique (GOODHOPE). Ces projets ont permis d'évaluer la



La réalisation de « sections » d'hydrologie / géochimie répétées, en zone subarctique (OVIDE), au passage de Drake (DRAKE) ainsi qu'au sud de l'Afrique (GOODHOPE), ont permis de définir des proxies qui rendent désormais possible, à partir de l'altimétrie satellitaire et de mesures systématiques in situ (Argo, radiales XBT), le suivi en continu de la variabilité temporelle de la circulation thermohaline atlantique et donc la détection du ralentissement éventuel de la circulation globale envisagé par les modèles du GIEC. © CNRS/LPO

## Les chantiers régionaux

variabilité des transports associés à la circulation thermohaline (par ex. :  $19 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  en septembre 1997 et  $11 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$  en juin 2006 mesurés au travers de la section OVIDE reliant le Groenland au Portugal). En réalisant également l'évaluation de méthodes de calcul de transport utilisant les mesures satellitaires (altimétrie) et des mesures *in situ* de mise en œuvre plus légère, ils ont contribué à la mise en place d'un suivi pérenne de cette circulation. Les projets DRAKE et GOODHOPE ont aussi contribué à mieux caractériser le courant circumpolaire antarctique et sa variabilité.

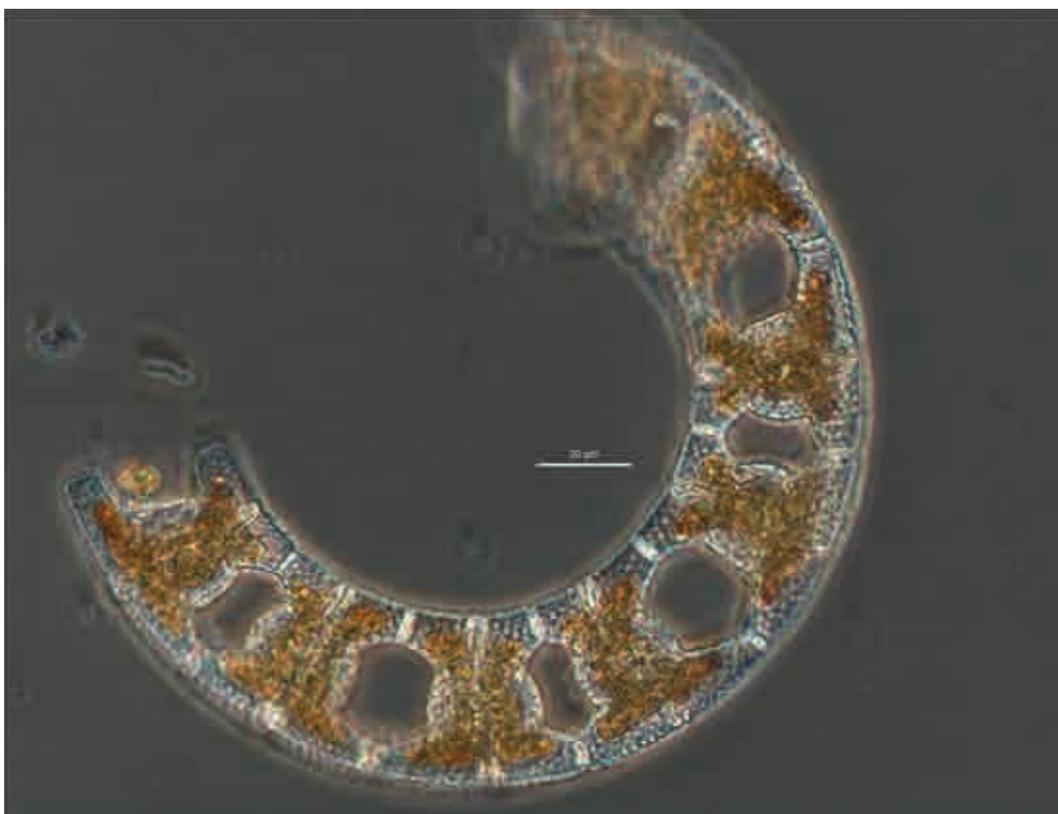
L'association des données Argo et satellitaires a également permis d'analyser et de mieux comprendre les variations du contenu thermique de la couche de mélange océanique. Ainsi, pour l'océan Austral, il a été montré que si les flux air-mer et le transport d'Ekman sont des processus déterminants, la diffusion tourbillonnaire latérale est également un mécanisme important qui influe sur la formation « d'eaux modales », lesquelles contribuent, après subduction, à la ventilation de l'océan mondial. Dans un contexte différent, le chantier Terre Adélie a permis d'étudier la variabilité de la formation des eaux denses sur le plateau antarctique (ALBION).

Le projet multidisciplinaire BONUS-GOODHOPE (Marion Dufresne, 2008), qui a contribué à l'Année polaire internationale et à GEOTRACES, s'est intéressé au couplage entre la circulation des

masses d'eaux et les cycles biogéochimiques dans le secteur atlantique de l'océan Austral (cap de Bonne Espérance), zone critique vis-à-vis des échanges de sels et de chaleur entre régions océaniques. Ces travaux ont démontré l'importance de la petite échelle (tourbillons, jets, filaments, courants de pente) sur le transfert des éléments biogéochimiques, notamment sur la séquestration de carbone par l'océan.

La compréhension des cycles biogéochimiques dans l'océan Austral a été améliorée grâce au programme SOLAS. La mission KEOPS (Marion Dufresne, 2005) a permis de démontrer pour la première fois que la fertilisation naturelle en fer de l'océan Austral augmentait l'exportation de carbone vers les eaux profondes, cette stimulation naturelle de la pompe biologique étant d'une efficacité 10 à 100 fois supérieure à celle précédemment estimée à partir d'expériences de fertilisation artificielle.

Ce mécanisme de fertilisation naturelle aurait pu être à l'œuvre dans le passé (par ex. durant la dernière période glaciaire) ou pourrait se reproduire dans le futur dans le contexte du changement climatique, et ce au niveau de vastes régions de l'océan Austral. Au-delà de ce résultat majeur, KEOPS a aussi démontré l'intérêt qu'il y a à conduire des études pluridisciplinaires dans des laboratoires naturels (ici, le plateau de Kerguelen) afin d'étudier de manière intégrée la réponse d'un écosystème marin à une perturbation.



La mission KEOPS a permis d'évaluer le rôle des apports en fer sur la productivité planctonique, celle-ci étant révélée entre autres par l'abondance des diatomées *Eucampia antarctica* (algue siliceuse) dans les zones fertilisées de l'océan Austral. © CNRS/LOMIC

Cette approche a généré de nombreux résultats sur les liens biodiversité / cycles biogéochimiques et circulation / géochimie.

En Antarctique côtier (base de Dumont d'Urville), le projet **ICO2TA** a permis de montrer que les variations interannuelles de la diversité pélagique (euphausiacés et poissons) sont liées aux changements de régime de la glace de mer et aux modifications de la masse d'eau.

L'opération **MALINA** a été conduite en 2009 dans l'océan Arctique depuis le Canada. Elle a permis d'étudier l'impact des modifications environnementales (diminution du couvert de glace, augmentation des UV, fonte du pergélisol, apports organiques continentaux) sur des processus photochimiques (production algale, photo-oxydation de la matière dissoute) et des processus de minéralisation et par voie de conséquence sur l'intensité des sources et puits de carbone.

D'autres programmes ont concerné l'Arctique européen (Svalbard), où les variations annuelles du milieu, sous l'influence des eaux atlantiques et arctiques, modifient les flux énergétiques, du plancton vers les échelons trophiques supérieurs. En domaine continental, l'existence d'une forte productivité primaire a été mise en évidence dans la « profondeur sombre » et anoxique d'un lac subarctique de la région d'Arkhangelsk contenant 15-20 mg/l de carbone organique dissous. Cette productivité ne peut être expliquée par le phytoplancton habituel, mais pourrait l'être par la présence de bactéries anoxiques. Enfin, il a été montré qu'en zone de pergélisol, les débits d'eau des grandes rivières sibériennes évoluent au cours du temps : ils dépendent des niveaux les plus superficiels de la zone active du pergélisol en début de crue (printemps), puis de niveaux de plus en plus profonds (quelques dizaines de centimètres et plus) jusqu'en fin de période estivale.

## ■ La région méditerranéenne

### • Le chantier « Méditerranée » (MISTRALS)

MISTRALS s'appuie sur des actions spécifiques (BIODIVMEX, CHARMEX, HYMEX, MERMEX, PALEOMEX, SICMED et TERMEX), destinées à couvrir ses différents champs disciplinaires. Les organismes signataires du CIO-Environnement ont rapidement considéré ce programme comme prioritaire. Il est désormais doté d'un comité de pilotage, de comités d'évaluation et d'une direction scientifique. La mise en place de ces structures de gouvernance ayant pris du retard, les actions scientifiques n'ont pu débuter qu'en 2011. Ainsi, les percées attendues de ce programme ne seront examinées que lors du prochain exercice de bilan-prospective Océan Atmosphère.

### • Le climat méditerranéen au cœur des préoccupations du GIEC

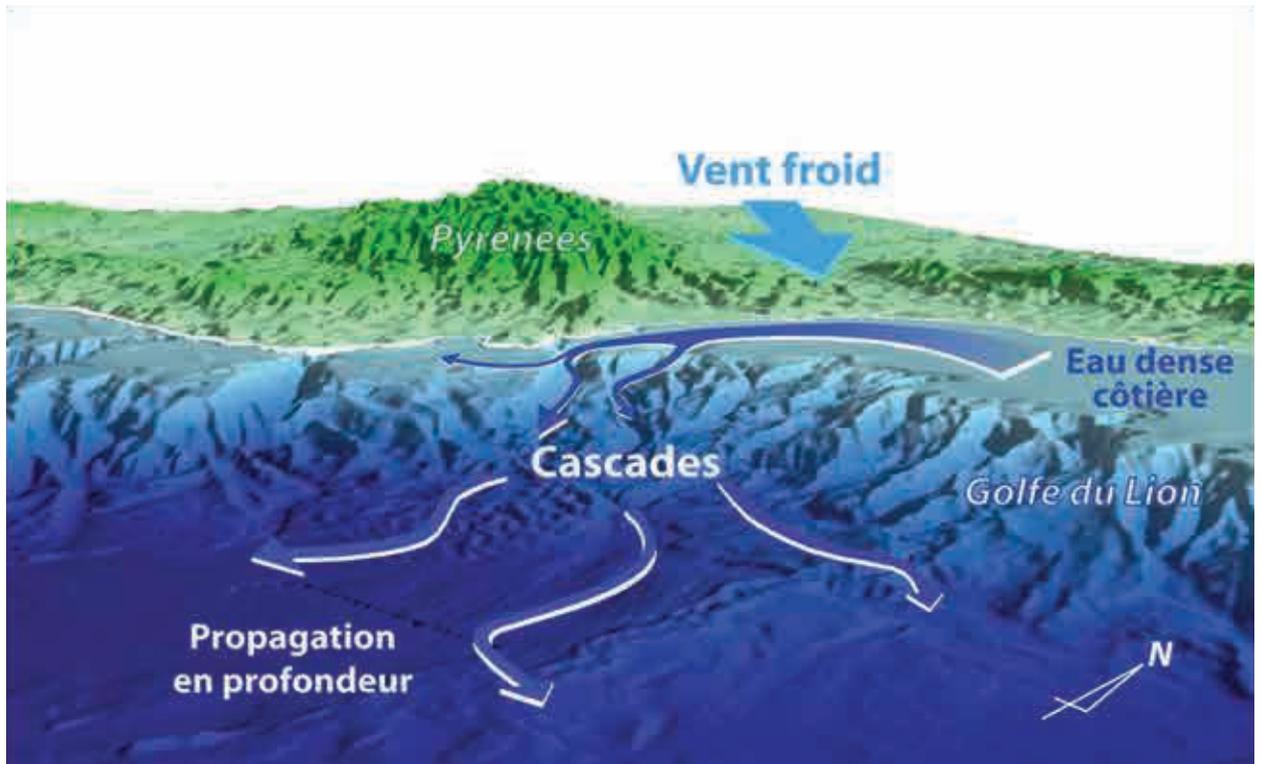
La dynamique de la communauté française participant à MISTRALS a permis que le bassin méditerranéen fasse partie des régions clés retenues par le GIEC pour son prochain rapport. Ainsi, dans le cadre du projet **CORDEX**, la plupart des groupes de modélisation produisant des simulations climatiques globales proposeront également des scénarios climatiques régionaux qui permettront de préciser l'évolution probable du cycle de l'eau et des événements extrêmes au niveau du bassin méditerranéen. La communauté française participe pleinement à cet exercice, préparant des modèles régionaux couplés plus complexes qu'auparavant qui seront des outils essentiels pour MISTRALS.

### • La pollution de l'air

Des résultats très intéressants ont d'ores et déjà été obtenus dans le cadre des campagnes **FORMES**, qui se sont déroulées à Marseille en été et à Grenoble en hiver ; de nouvelles méthodologies de détermination quantitative de la contribution des différentes sources de pollution (primaire et secondaire) à la fraction organique de l'aérosol urbain ont été développées et optimisées. La contribution des sources primaires a été quantifiée au moyen du modèle « Chemical mass balance », en s'appuyant principalement sur des traceurs organiques, une méthodologie qui a été confortée par des analyses isotopiques du carbone et l'utilisation de méthodes statistiques plus souples en termes de connaissance des profils de sources (UNMIX, PMF). La contribution des sources secondaires, beaucoup plus complexe à appréhender, a été évaluée à partir des résultats obtenus à l'aide d'un spectromètre de masse à aérosols (AMS) ainsi qu'en étudiant les relations entre les propriétés physiques des particules (volatilité et hygroscopicité) et les processus photochimiques donnant naissance à l'aérosol organique secondaire.

### • Le « cascading » dans le golfe du Lion

Le « cascading » est un phénomène de plongée hivernale d'eaux denses côtières, qui se vidangent très rapidement vers les zones abyssales, en particulier *via* les nombreux canyons qui incisent la pente continentale. Ce processus a fait l'objet d'études pluridisciplinaires détaillées en Méditerranée où trois zones ont été identifiées (EUROSTRATAFORM, HERMES et HERMIONE). Ces plongées hivernales entraînent de grandes quantités de matière vers les abysses. En 2005 par exemple, 2 000 km<sup>3</sup> d'eau ont ainsi été transférés en profondeur en 6 à 8 semaines, exportant 15 000 tonnes C/jour. Ces épisodes peuvent avoir un impact fort sur la faune et particulièrement sur les espèces commercialisées.



*Cascades d'eaux denses formées sur le plateau continental du golfe du Lion et descendant vers les plaines abyssales via les canyons entaillant le talus continental. © CNRS/CEFREM*

Ainsi, les crevettes, abondantes en temps normal, disparaissent localement et pour plusieurs années à l'occasion de tels événements. La modélisation de ce mode de transport de matière côte – large est désormais opérationnelle et reproduit très bien les observations.

### • Les aires ultra-oligotrophes de la Méditerranée orientale

Le fonctionnement et la productivité des systèmes oligotrophes ainsi que le rapport entre production et minéralisation dans ces systèmes sont encore sujets à débat, mais il a récemment été démontré que ces systèmes peuvent largement contribuer, *via* des processus biologiques, à l'exportation de carbone. La campagne BOUM réalisée sur l'Atalante en 2008 s'est intéressée au gradient

trophique longitudinal qui caractérise la mer Méditerranée durant la période estivale, avec pour objectif de décrire les masses d'eaux et la diversité biologique. Des études de processus ont été réalisées au centre de grands tourbillons anticycloniques. Elles ont permis de mettre en évidence un épuisement des sels nutritifs en surface, un approfondissement de la nutricline et de faibles rapports de concentration nitrate / phosphate, les nitrates et phosphates étant les deux nutriments majeurs contrôlant la production planctonique océanique. Dans la mesure où l'épuisement des éléments nutritifs dans la couche de surface peut être considéré comme le résultat ultime de l'efficacité de la pompe biologique, il est possible de conclure à l'importance des tourbillons dans les bilans biogéochimiques en mer Méditerranée et probablement dans l'océan oligotrophe. BOUM servira de campagne de référence aux futures opérations de MISTRALS, en particulier de MERMEX.

# Forces et faiblesses de la communauté

## ■ Une structuration accrue

En permettant le regroupement d'équipes autour de projets communs (MISSTERRE, TWISTED, ondes internes, ESCARCEL...), une meilleure coordination dans la préparation de nouvelles campagnes interdisciplinaires (LATEX, OVIDE, MEGAPOLI, KEOPS...), le développement d'échanges scientifiques entre différentes communautés disciplinaires (mathématiciens, physiciens) autour de recherches théoriques et la généralisation des comparaisons modèles / données, le programme LEFE a eu un effet particulièrement structurant pour la communauté Océan Atmosphère. Une synergie nouvelle entre atmosphériciens, océanographes et hydrologues a également vu le jour grâce à l'Action programmée internationale AMMA, qui a rassemblé autour de l'étude de la mousson africaine un grand nombre de scientifiques des communautés Océan Atmosphère et Surfaces et Interfaces Continentales, aux niveaux national et international (≈ 600 participants, 140 laboratoires, 30 pays, ≈ 400 publications). Néanmoins, la mise en place du « chantier Méditerranée » MISTRALS a mis en évidence la difficulté qu'il y a à construire un programme de grande envergure en partant d'une initiative ciblée des chercheurs et en l'élargissant pour répondre au mieux à la demande sociétale.

## ■ Une forte implication sur la scène internationale

Aujourd'hui, la très grande majorité des chercheurs de la communauté Océan Atmosphère s'implique fortement dans des actions internationales, ce qui les conduit parfois à des positions de leadership comme dans les programmes AMMA, IMAGES et, au niveau européen, EPOCA, EUSAAR, ICOS-IAGOS et MYOCEAN.

Par conséquent, ces participations à l'international doivent être mieux prises en compte dans la programmation de la recherche nationale. En outre, nombreux sont dorénavant les financements nationaux qui accompagnent des financements

européens (FP6-7, accords binationaux), une situation qui nécessite que soit renforcée l'aide apportée aux chercheurs par les organismes dans la gestion de ces montages financiers complexes.

## ■ Une prise en compte croissante de la demande sociétale

La dernière prospective (Lille 2005) soulignait la nécessité d'apporter des réponses aux interrogations sociétales. Depuis lors, la communauté a apporté à cette question une contribution significative dans plusieurs domaines où les attentes étaient fortes, aussi bien au niveau fondamental (réchauffement global, pollution, ressource en eau, érosion littorale) qu'au niveau opérationnel avec le développement de nouvelles applications (Mercator Océan, AROME) et sa participation active à la mise en place de GMES.

## ■ Les difficultés rencontrées

Au niveau national, la communauté Océan Atmosphère doit s'adapter à un contexte financier de plus en plus difficile et à des modes de financement nécessitant la recherche de soutien auprès de multiples structures (organismes, ANR, régions, Europe...). Cette situation mène fréquemment à un découplage entre les stratégies régionales (universités autonomes) et nationales qui peut être préjudiciable au montage des projets.

L'expérimentation *in situ* étant au cœur des activités de la communauté Océan Atmosphère, l'accès au terrain est indispensable à la réalisation des expériences permettant d'avancer dans la connaissance des processus et des mécanismes. Dans ce contexte, la communauté scientifique Océan Atmosphère est extrêmement préoccupée par l'augmentation des problèmes d'accès à certains moyens lourds de campagne (avions, ballons, navires hauturiers et côtiers).



# Prospective scientifique

# Enjeux scientifiques majeurs dans le domaine des enveloppes fluides

Une réflexion approfondie a été menée par la communauté sur les processus qui contrôlent les évolutions de l'océan, de l'atmosphère et de la cryosphère, de façon à dégager des axes prioritaires à moyen terme sur lesquels concentrer les efforts de recherche à venir et orienter les programmes. Ces axes de recherche sont développés ci-dessous pour chacun des grands domaines de recherche suivants : « Chimie atmosphérique », « Cycles biogéochimiques, écosystèmes marins et ressources », « Interactions multiples océan – atmosphère – cryosphère » et « Interfaces ». Sont également proposés, un élargissement, vers de nouvelles approches, des recherches menées sur les méthodes numériques ainsi que des actions pour améliorer les outils de modélisation du Système Terre selon des axes clairement identifiés, incluant une focalisation sur la modélisation du domaine côtier qui est en pleine mutation.

## ■ Chimie atmosphérique

Les principales espèces chimiques réactives présentes dans l'atmosphère - photo-oxydants, acides, aérosols, radicaux, ainsi que leurs précurseurs - affectent de façon directe ou indirecte la qualité de l'air et le climat. L'évaluation des synergies et antagonismes entre les processus en jeu, qui diffèrent selon les espèces et les échelles de temps et d'espace considérées, est donc capitale pour établir des priorités sur les réductions d'émission à mettre en œuvre. Pour y parvenir, une meilleure compréhension et une meilleure quantification des mécanismes de transformations chimiques et physiques des espèces dans les différentes phases, de leur transport dans les différents compartiments de l'atmosphère et de leurs échanges aux interfaces (émissions, dépôts) sont nécessaires.

Ce contexte général a été validé par la communauté internationale dans le cadre de la prospective du programme IGBP. Plusieurs questions transverses en découlent qui devront être abordées en recherchant une forte synergie entre études de laboratoire, expériences de terrain et modélisation. Elles concernent en priorité :

- l'étude des différents aspects de la capacité oxydante de la troposphère ; il s'agit d'une part de développer une meilleure connaissance des sources et puits des composés organiques polyfonctionnels qui sont importants pour le bilan des radicaux HOx, en tant que réservoirs pour les oxydes d'azote, et comme précurseurs de l'aérosol organique secondaire dont les voies de formation et d'évolution restent encore aujourd'hui mal comprises ; pour avancer dans ce domaine, il est maintenant capital de considérer conjointement

l'évolution de la matière organique en phases gazeuse, aqueuse et particulaire ; il s'agit d'autre part d'étudier le rôle de l'aérosol mais aussi d'autres types de surfaces (neige, glace, sol...), en tant qu'éventuels catalyseurs de réactions chimiques affectant directement le bilan des radicaux HOx et halogénés ; il s'agit enfin d'étudier spécifiquement l'évolution chimique de l'aérosol car elle en modifie les propriétés physicochimiques, lesquelles déterminent son impact sur le bilan radiatif, la dynamique de l'atmosphère, la microphysique des nuages et la santé ;

- l'étude couplée des processus chimiques et des processus de transport dans les différents compartiments de l'atmosphère (couche limite polluée, troposphère, stratosphère) et aux différentes échelles spatiales (de l'échelle de la turbulence à l'échelle globale), indispensable à la compréhension des interactions entre chimie de l'atmosphère et climat et à la prévision de la variabilité de la composition atmosphérique et du climat ;
- la modélisation des émissions et dépôts des gaz et particules aux interfaces, que ces dernières soient urbanisées ou naturelles ; les modèles devront prendre en compte ces interfaces en tant que régulateurs actifs, en dépassant la vision traditionnelle de cadastre d'émission statique et en intégrant les sources ponctuelles au niveau de la sous-maille (panaches de pollution) ; l'observation continue des flux et l'évaluation de l'incertitude des modélisations restent indispensables.

Ces actions requerront d'assurer la continuité à long terme des observations chimiques, *in situ* et satellitaires, et des mesures de flux (en particulier dans le cadre des Services

d'observation). Le développement de l'assimilation de ces données dans les modèles, la modélisation multi-échelle et l'évaluation des incertitudes des simulations constitueront des étapes indispensables pour une meilleure compréhension de l'évolution physicochimique de l'atmosphère. Les travaux en spectroscopie sur des molécules clés du bilan radiatif ou de la chimie de l'atmosphère devront être poursuivis pour assurer une inversion optimale des observations satellitaires. Des études spectroscopiques devront également être entreprises pour permettre une meilleure détection *in situ* de ces molécules. Enfin, l'accès à des spectromètres de masse innovants en termes de sensibilité et de fréquence de mesure sera nécessaire pour atteindre les objectifs affichés.

L'étude de ces questions scientifiques prioritaires bénéficiera en particulier de l'implication de la communauté dans l'action MISTRALS/CHARMEX.

## ■ Cycles biogéochimiques, écosystèmes marins et ressources

Dans ce domaine, les objectifs sont de mieux comprendre, quantifier et prédire les interactions et rétroactions entre le changement climatique, les cycles biogéochimiques et le fonctionnement des écosystèmes marins. Ceci permettra d'évaluer plus précisément les capacités de production de ces écosystèmes (des niveaux primaires jusqu'aux ressources) ainsi que les impacts du changement climatique sur ces écosystèmes.

Depuis quelques années, la communauté réfléchit sur des sujets de recherche émergents, portant sur :

- les modifications physicochimiques de la colonne d'eau, en réponse aux forçages anthropiques et naturels, et leurs effets sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes et des cycles biogéochimiques (stratification, désoxygénation, acidification, eutrophisation...);
- le rôle clé de la biodiversité sur les cycles biogéochimiques ;
- le développement d'indicateurs de la qualité écologique des écosystèmes marins.

Il est recommandé de les décliner sur des écorégions ciblées incluses ou non dans les chantiers régionaux (Méditerranée, Arctique, Zone de minimum d'oxygène...) afin de pouvoir prendre en compte les écosystèmes dans leur globalité.

Les objectifs prioritaires suivants ont été déclinés, en lien avec les thématiques des programmes internationaux traitant des cycles biogéochimiques, des réseaux trophiques et des ressources (IMBER, SOLAS, GEOTRACES et LOICZ) :

- améliorer la compréhension des processus couplés physique–biogéochimie dans la zone épipélagique, aussi bien côtière qu'hauturière, à des échelles spatiotemporelles clés (rôle de la stratification et de la déstratification de la colonne d'eau à l'échelle saisonnière, rôle des processus dynamiques de la submésos-échelle à l'échelle des bassins, compréhension des mécanismes contrôlant la production marine de l'échelle saisonnière à l'échelle pluridécennale) ;
- améliorer les connaissances sur les couplages entre la transformation des particules et leur transport sur l'ensemble de la colonne d'eau, particulièrement aux interfaces et dans les zones méso- et bathypélagiques ;
- améliorer la compréhension des cycles biogéochimiques des macro et micronutriments, de leurs apports dans la zone productive et de leur utilisation par les producteurs primaires ; ceci repose en particulier sur le développement de traceurs de processus biogéochimiques et physiques dans l'océan moderne et d'indicateurs des conditions du passé (proxies) ;
- évaluer le rôle de la diversité des communautés planctoniques dans les écosystèmes marins, afin d'améliorer l'identification et la modélisation des groupes fonctionnels majeurs agissant sur le couplage des éléments biogènes et modulant les flux de carbone.

Enfin, si la compréhension des processus de production dans les premiers niveaux trophiques a fait des progrès considérables, il semble indispensable de promouvoir des recherches portant sur les niveaux trophiques supérieurs correspondant aux ressources exploitables.

Ces objectifs prioritaires nécessiteront de nouvelles capacités de mesure et d'observation telles que la mise en place de capteurs autonomes et de plateformes lagrangiennes et tractées, l'utilisation de capteurs miniaturisés, le développement d'outils de mesure des éléments traces et isotopes et d'outils moléculaires (génomique, protéomique...) et l'exploitation plus qualitative de la télédétection de la couleur de l'eau (distribution des types fonctionnels du phytoplancton). Ils requerront également de développer l'expérimentation en conditions contrôlées ainsi que la modélisation et l'assimilation de données à différentes échelles.

Les relations désormais établies entre champs méthodologiques et disciplinaires (modélisation, observation, expérimentation, physique, chimie et biologie), et qui ont permis à la communauté biogéochimique française de s'engager fortement dans le développement de systèmes d'observation long terme et de systèmes de modélisation du fonctionnement des écosystèmes marins, devront être maintenues.

## ■ Interactions multiples atmosphère – glace – océan

La finalité des recherches dans ce domaine est de mieux observer, simuler et comprendre, à l'échelle globale, régionale ou locale, les fluctuations de l'atmosphère, de la surface continentale et du milieu marin, sur des échelles de temps allant de l'heure au plurimillénaire. Compte tenu de l'importance des interactions d'échelle, les études à grande échelle s'avèrent indissociables des études de processus à toutes les échelles, même aux plus petites.

Les travaux de la communauté française sur les enveloppes fluides (océan, atmosphère, cryosphère), le climat et les processus d'interaction ont pour objectifs d'améliorer :

- la compréhension de la dynamique et la prévision à court et moyen termes de l'état de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales ;
- la compréhension et la simulation de la variabilité du climat, l'identification des processus en jeu et l'estimation de la prévisibilité des paramètres climatiques, des échelles intra-saisonnière à décennale ;
- la compréhension, l'attribution et la simulation à long terme de l'évolution des climats passés et futurs, y compris des changements abrupts et des événements extrêmes.

Ces trois enjeux scientifiques sont en pleine adéquation avec les prospectives et les priorités des grands programmes internationaux (e.g. CLIVAR, GEWEX et CLIC).

Les activités de recherche couvrant ces objectifs font l'objet de cinq recommandations :

- processus et couplages : favoriser l'étude, à partir des observations et de la modélisation, des différents processus (physiques, chimiques et biologiques) qui régissent l'état et les interactions des composantes du système climatique, y compris au niveau du littoral et des milieux côtiers ;
- variabilité interne et prévisibilité climatique : mieux décrire les causes physiques des modes de variabilité et leurs caractéristiques statistiques, le rôle des télé-connexions (relations entre anomalies climatiques distantes) et celui des forçages externes ;
- sensibilité climatique et rétroactions physiques et biogéochimiques : renforcer le développement des méthodologies permettant de comprendre l'origine de la robustesse de certains résultats et les causes de dispersion des simulations des différents modèles climatiques et de confronter les modèles aux observations pour en évaluer la performance ;

- spécificités régionales du climat : mieux estimer et comprendre les parts respectives des phénomènes grande échelle et des phénomènes locaux sur les climats régionaux et quantifier leurs interactions, estimer la faisabilité et la fiabilité des prévisions à l'échelle locale et développer des méthodes novatrices de descente d'échelles ;
- mécanismes de variabilité du cycle de l'eau et du niveau des mers : mieux comprendre et prévoir les évolutions spatiales et temporelles (y compris extrêmes) des différentes composantes du cycle hydrologique ainsi que l'évolution du niveau des mers et ses possibilités de changements abrupts, de très forte amplitude ou de type « non-retour ».

Dans ce but, il sera nécessaire d'améliorer les systèmes d'observation de manière à répondre aux besoins croissants de mesures ayant une fréquence temporelle plus élevée et/ou une couverture spatiale plus dense, de séries d'observations qualifiées et homogènes dans le temps et l'espace et de ré-analyses. Il s'agira également de faciliter l'accès aux données, en particulier pour des traitements et analyses croisés. Enfin, il sera nécessaire de développer et d'améliorer les modèles, à savoir comprendre et réduire leurs biais systématiques, améliorer les méthodes de validation et ouvrir de nouveaux champs d'utilisation par l'amélioration de la représentation des mécanismes existants, l'introduction de nouveaux processus et une meilleure prise en compte des petites échelles.

Globalement, les actions ou développements méthodologiques suivants sont proposés :

- développer des approches intégrées entre observation, assimilation et modélisation, permettant d'aller vers une meilleure compréhension des rétroactions entre processus et climat ;
- encourager les efforts de coordination thématique au niveau national, tels ceux menés avec succès pour la simulation à haute résolution de l'océan physique (DRAKKAR) et de son couplage avec la biogéochimie (TANGGO), pour la modélisation intégrée du Système Terre (MISSTERRE) ou pour la physique des modèles atmosphériques (DEPHY) ;
- faciliter le transfert d'expertise et d'outils entre les communautés recherche et opérationnelle (en météorologie et océanographie), notamment pour l'assimilation ;
- encourager le développement, la mise à disposition et l'utilisation d'une hiérarchie de modèles de différentes complexités.

Enfin, il sera souhaitable de renforcer les interactions entre les communautés Océan Atmosphère et Surface et Interfaces Continentales.

## ■ Acidification des océans

Les émissions anthropiques de dioxyde de carbone sont à l'origine d'un phénomène moins connu mais tout aussi sérieux et inquiétant que le réchauffement climatique : l'acidification des océans. Depuis 1800, le tiers des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines a été absorbé par les océans. On estime aujourd'hui cette absorption à 24 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par jour. Cette absorption massive a modéré les changements climatiques, mais elle entraîne un bouleversement de la chimie de l'eau de mer : augmentation du carbone inorganique total et diminution du pH et de la concentration en carbonates. Ces paramètres, majeurs dans le contrôle de nombreux processus biologiques (photosynthèse, calcification, fixation d'azote...), participent aussi aux cycles biogéochimiques globaux. Au rythme des émissions actuelles, le pH moyen devrait diminuer de 0,4 unités d'ici 2100, ce qui correspond à un triplement de l'acidité des océans.

En raison de la complexité du phénomène et de ses implications, l'acidification des océans couvre de nombreux champs disciplinaires : paléontologie, paléo-océanographie, physiologie, écologie, biogéochimie et climatologie (de par les rétroactions entre la biogéochimie et le climat) ainsi que socio-économie (du fait à la fois des pressions anthropiques et des rétroactions sur les activités humaines). La compréhension de son impact sur le milieu naturel a fait d'importants progrès ces dernières années, notamment dans le cadre du projet européen EPOCA coordonné par le CNRS-INSU.

Il convient donc aujourd'hui d'encourager une implication plus forte de la communauté scientifique nationale, en particulier dans les domaines pour lesquels elle possède des atouts certains.

On citera :

- la réduction des incertitudes liées aux impacts biologiques et biogéochimiques de l'acidification en étudiant les événements d'acidification passés (paléo-océanographie) ou en mettant en œuvre des approches expérimentales en milieu contrôlé ; les interactions avec d'autres modifications globales comme l'augmentation de la température et la désoxygénation devront être explorées ; l'étude des marqueurs biologiques et géochimiques des conditions paléo-écologiques devra être favorisée ; il conviendra également de mesurer et d'estimer les changements futurs de la chimie des carbonates, particulièrement pour les régions et écosystèmes menacés (par exemple, l'Arctique, la Méditerranée et les zones coralliennes) ; il faudra enfin renforcer les collaborations entre équipes de paléo-océanographes travaillant sur des systèmes régionaux différents ;
- l'estimation de l'impact de l'acidification sur la biogéochimie marine et de la rétroaction sur le climat (biogéochimie et biologie marine, physique, modèles couplés) ;
- l'étude de l'impact de l'acidification combinée à d'autres facteurs de stress sur l'acclimatation physiologique, la biodiversité, l'adaptation évolutive, ainsi que sur les populations, les écosystèmes et le réseau trophique ; des collaborations devront être mises en place afin de favoriser une approche intégrée de cette question.

Enfin, pour estimer l'impact de l'acidification sur les services écologiques (bénéfices que les humains retirent des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir), il faudra mettre en place des projets communs avec les socio-économistes. Ce type de collaboration devrait permettre de répondre avec plus de pertinence aux questions sociétales.

## ■ Interfaces

Les compartiments du Système Terre échangent continuellement à travers leurs interfaces. Ces échanges jouent un rôle majeur dans les bilans de matière et d'énergie et donc dans l'évolution des caractéristiques thermiques (flux de chaleur), mécaniques (flux de quantité de mouvement), chimiques (flux de masse et d'éléments) et biologiques (flux de gènes) des compartiments. C'est aussi aux interfaces que s'établissent les interactions ainsi que les boucles de rétroaction entre compartiments.

L'étude des interfaces doit considérer celles-ci comme des lieux d'échange d'énergie et de matière, mais aussi des lieux

de transformation de cette matière. Elle nécessite donc de s'intéresser à la fois à la quantification des flux et à l'étude des processus. Ces transformations de matière génèrent en outre des rétroactions à l'intérieur de l'interface, entre processus physiques, chimiques et biologiques, qui demandent à être mieux connues car elles modifient les propriétés de l'interface elle-même. Par ailleurs, les problèmes d'échelle sont cruciaux. De nombreux processus agissant aux interfaces peuvent avoir en effet des impacts très différents en fonction des échelles spatio-temporelles considérées. Concernant cette question, certains verrous ont été identifiés qui devront être résolus : il s'agit par exemple de la représentativité de la mesure, de la description « sous-maille » ou de l'emboîtement des modèles.

## Enjeux scientifiques majeurs dans le domaine des enveloppes fluides

Malgré leur diversité, les interfaces posent des questions communes. Il faudra en priorité :

- étudier l'impact de l'hydrodynamique des interfaces à petite et moyenne échelle sur les échanges de matière et d'énergie et sur le fonctionnement des communautés biologiques, ce qui conduira à développer de nouveaux traitements des équations prenant en compte les variations de la rhéologie au sein de l'interface ;
- identifier les processus physicochimiques et biologiques responsables d'interactions entre phases solides (sol, sédiment ou particules) et milieu fluide (eau et air) ;
- quantifier les émissions, transformations et dépôts de matière et gaz et leurs impacts sur les flux chimiques aux interfaces ;
- hiérarchiser les processus actifs aux interfaces en fonction des bilans de matière et d'énergie et des échelles spatio-temporelles étudiées.

Ces questions requièrent de façon critique des observations de terrain, des observations satellitaires et des expérimentations en laboratoire, qu'il est fondamental de développer dans un cadre pluridisciplinaire.

À terme, la compréhension du fonctionnement du Système Terre nécessitera la construction d'un modèle conceptuel puis quantitatif des échanges d'énergie et de matière entre tous les compartiments de ce Système. Il sera alors indispensable d'étendre les interactions actuellement étudiées par la communauté à celles se produisant avec les réservoirs « solides », et de traiter ces nouvelles questions dans un cadre plus large que celui du seul domaine Océan Atmosphère.

### ■ Méthodes mathématiques et numériques

Les « méthodes mathématiques et numériques » au sens large sont devenues des outils de recherche indispensables à l'étude de l'atmosphère et de l'océan dans leurs aspects physiques, chimiques et biologiques. Elles interviennent à tous les niveaux (modélisation, assimilation de données, quantification des incertitudes, analyse de données) et font appel à des notions mathématiques et à des moyens de calcul de plus en plus sophistiqués. Elles sont caractérisées par leur contenu méthodologique (comportant un fondement mathématique solide), leur contenu numérique (avec recours au calcul sur ordinateur) et leur contenu générique (non lié à une application ou à un modèle spécifique). Les méthodes mathématiques et numériques ont permis ces dernières

années des avancées scientifiques remarquables dans de nombreux domaines d'étude de l'océan et de l'atmosphère et leur rôle va s'amplifier dans les années à venir.

Les principales directions de recherche identifiées comme prioritaires à 5-10 ans sont les suivantes :

- modélisation : améliorer les cœurs numériques des modèles, notamment en fonction de critères liés à la physique ; développer des méthodes permettant de mieux prendre en compte les interactions d'échelle et les couplages entre les différents processus ; tester les approches « alternatives » (modèles de complexité réduite, approches mixtes déterministes / statistiques... ) ;
- assimilation de données : progresser sur des difficultés méthodologiques récurrentes (modélisation des covariances d'erreur, prise en compte des biais et des erreurs des modèles, assimilation dans les systèmes couplés...) ou en forte émergence (traitement des fortes non-linéarités et des distributions non gaussiennes, application à des modèles et observations multi-échelles, prise en compte de nouveaux types de données comme les images...) ; développer de nouvelles applications, notamment la prévision climatique à l'échelle décennale ; déterminer les meilleures conditions permettant d'optimiser le triptyque modèle / données / méthode d'assimilation ;
- quantification des incertitudes : développer des méthodes d'analyse de sensibilité afin d'identifier et de hiérarchiser les sources d'incertitude ; rationaliser les choix inhérents aux approches d'ensemble (prévision d'ensemble, assimilation d'ensemble, approches multimodèles) ; progresser dans le ciblage des meilleures observations ;
- méthodes d'analyse : améliorer la qualité de l'analyse des données en collectant et diffusant des outils pertinents (statistiques avancées, analyse de systèmes dynamiques, traitement du signal et des images, visualisation...).

Étant donné la complexification des méthodes et la généralisation de leur utilisation, il devient primordial d'encourager le développement d'outils communautaires : codes numériques et leur environnement, bibliothèques d'assimilation, outils d'analyse de données... Il faudra de plus faire évoluer ces outils en fonction des profondes modifications d'architecture des nouveaux calculateurs. À cet égard, garantir la présence d'ingénieurs permanents au sein des équipes en charge de ces codes et outils représente un aspect stratégique essentiel. Il est également primordial de stimuler la diffusion des méthodes et outils vers la communauté Océan Atmosphère et le partage d'expertise. Il faudra pour cela notamment former les jeunes

chercheurs sur ces sujets. Enfin, il est important d'encourager les interactions entre la communauté Océan Atmosphère et les informaticiens et mathématiciens appliqués, comme cela s'est fait en particulier pour l'assimilation de données.

## ■ Modélisation du domaine côtier

L'ambition d'un système de modélisation côtière est de restituer, au travers de formalismes mathématiques et de méthodes numériques, le meilleur niveau de compréhension du fonctionnement de l'environnement côtier (physique, sédimentaire, biogéochimique et biologique), afin d'en prédire les évolutions sous la pression d'une combinaison de forçages. Situé au cœur de ce système, le modèle dynamique d'océan régional et côtier doit être capable de représenter la dynamique océanique depuis l'océan profond jusqu'aux grands estuaires (échelles de la centaine de kilomètres à la centaine de mètres) et de s'interfacer avec les modèles d'atmosphère, de vagues et de sédiments, les modèles biologiques et les modèles littoraux (ces derniers ayant pour objectif de représenter des échelles plus fines dans les zones peu profondes affectées par le déferlement des vagues).

Plusieurs modèles dynamiques sont développés en France, souvent dans le cadre de consortiums internationaux. Du fait de la variété des processus et des échelles de temps et d'espace propres à l'océan côtier, ces modèles sont complexes et leur évolution se fait sur le long terme (4 à 10 ans). Ils se distinguent les uns des autres par les hypothèses qui sous-tendent leurs systèmes d'équations, par leurs schémas numériques et par leur paramétrisation des échelles sous-maille, chacun comportant des avantages et des inconvénients selon l'échelle considérée. L'identification des choix optimaux à faire pour faire progresser ces modèles est un enjeu majeur.

Pour faire évoluer les noyaux dynamiques de ces modèles, la communauté devra s'appuyer sur une approche coordonnée tirant parti de la diversité des compétences au plan national. Il faudra notamment :

- évaluer la résolution effective des modèles en présence de cascades turbulentes, développer des systèmes de coordonnées verticales arbitrairement Lagrangienne-Eulériennes ;
- explorer le potentiel de grilles non structurées ;
- mieux représenter la dynamique au-dessus des forts accidents bathymétriques ;
- mieux contrôler le mélange vertical (diapycnal).

Ces actions devront être menées en tenant compte de la nécessité d'un parallélisme massif des codes. Le projet COMODO contribuera à structurer la communauté nationale pour aborder ces questions. Une réflexion sur la mutualisation devra néanmoins l'accompagner : développement de modules communs à plusieurs modèles, d'outils communautaires de pré ou post-processing et de diagnostics, ou encore mise à disposition des données de validation des modèles obtenues sur les côtes françaises. Ces efforts de mutualisation devraient permettre à terme la mise en place d'une plateforme commune de modélisation intégrant différents noyaux dynamiques.

Des processus essentiels dans le domaine côtier doivent encore être intégrés dans les modèles dynamiques, notamment la prise en compte des vagues et des interactions houle – courant ou encore le couplage océan – atmosphère aux échelles pertinentes. Pour améliorer le couplage des modèles dynamiques avec les modèles sédimentaires, biogéochimiques et biologiques, outre les améliorations nécessaires dans la formulation des processus qu'ils mettent en jeu, des progrès sont à accomplir dans la représentation des échanges verticaux et des couches limites de fond et de surface. Un meilleur interfaçage est nécessaire entre les modèles du domaine côtier et ceux des domaines hauturier et littoral, afin de quantifier les transferts entre ces différents domaines, en particulier en termes de flux de sédiments. Enfin, des progrès en assimilation de données devront être accomplis du fait de la spécificité des observations du domaine côtier (radars haute fréquence pour les courants par exemple) et de leur faible densité au regard des échelles dynamiques.

Une réflexion sur la mise en place d'un service d'océanographie opérationnelle côtière est en cours. Elle devra se poursuivre dans le cadre d'un dialogue renforcé des acteurs du SNOCO avec la communauté nationale des chercheurs en océanographie côtière et littorale afin que puissent être précisément définis les attentes de ce service vis-à-vis de la communauté et inversement les produits qu'il pourra mettre à la disposition des chercheurs.

## ■ Modélisation du Système Terre

Le développement d'outils destinés à modéliser les enveloppes superficielles que sont l'atmosphère, les océans, les glaces, la biosphère et la partie superficielle des continents est indispensable pour mieux comprendre le fonctionnement du Système Terre. La communauté française doit conforter sa place au sein du GIEC, en particulier pour la réalisation des simulations climatiques servant de base aux analyses du groupe d'experts (exercice de simulation CMIP). La priorité donnée pendant quelques années à la complexification des modèles

## Enjeux scientifiques majeurs dans le domaine des enveloppes fluides

couplés doit maintenant être complétée par des travaux sur la qualité de la représentation de la physique atmosphérique et sur l'impact d'une meilleure résolution horizontale et verticale des modèles sur les simulations. Parallèlement, la compréhension des processus responsables de la variabilité climatique et la quantification des incertitudes associées restent un axe de travail essentiel de la communauté.

Les recherches et les développements en modélisation à conduire au cours des prochaines années devront donc viser principalement à :

- maintenir un ensemble de systèmes numériques de complexité croissante pour aborder tout un spectre de questions scientifiques variées ;
- augmenter le réalisme des modèles dans la simulation du climat actuel et leur capacité de prévision, grâce à une amélioration de la représentation des processus physiques ;
- adapter les plateformes de modélisation aux divers types de calculateurs, notamment aux machines pétaflopiques qui permettent de réaliser des simulations à beaucoup plus haute résolution et des ensembles plus importants de simulations ;
- mettre en œuvre des stratégies communes de validation des simulations climatiques et définir des métriques (critères numériques de comparaison) ;
- donner accès aux simulations à l'ensemble des communautés de recherche intéressées, au-delà de la seule communauté climatique.

Satisfaire ces objectifs implique qu'un certain nombre d'actions soient menées, parmi lesquelles :

- le partage des outils numériques ou des méthodes permettant de faciliter la comparaison des simulations du climat à des jeux de données d'observation ;
- la poursuite de l'effort de développement des systèmes couplés et de l'effort de parallélisation des codes ;

- la généralisation du partage des composantes, modules et « blocs » de paramétrisation des modèles, et du partage des développements de leurs « cœurs dynamiques », entre groupes de développeurs aux niveaux français et européen ;
- la poursuite des travaux coordonnés visant au développement de méthodes de validation et à l'amélioration des schémas existants ou au développement de nouveaux schémas ;
- l'identification des atouts / défauts des différents systèmes de modèle en effectuant des simulations pour des configurations très variées de ces systèmes (paléoclimat, système idéalisé...) ;
- la réalisation de simulations de pointe à forte résolution horizontale et verticale sur les machines les plus performantes (classe Tier0) de l'infrastructure de recherche européenne PRACE ;
- la réalisation de simulations tests des différentes composantes du Système Terre effectuées en mode forcé et en mode guidé ;
- l'archivage des simulations de référence dans les bases de données distribuées nationales et internationales.

La réflexion prospective sur la modélisation du Système Terre et sur la modélisation du domaine côtier a fait émerger des recommandations communes qui, généralisées ici à tous les outils de modélisation numérique de la communauté Océan Atmosphère, sont les suivantes :

- favoriser le développement de modules partagés entre les différents codes, aussi bien pour les méthodes mathématiques incorporées aux modèles que pour l'évaluation des résultats ;
- mettre en place des systèmes pérennes, faisant intervenir à la fois les groupes de modélisation et les centres de calcul et s'inspirant du modèle des Services d'observation, pour diffuser les résultats des simulations numériques auprès de la communauté scientifique dans son ensemble ;
- soutenir les codes communautaires dans leur effort de convergence vers une plateforme commune.

# Approche intégrée des changements environnementaux planétaires à l'échelle régionale

Les chantiers en Afrique de l'Ouest (AMMA), en Méditerranée (MISTRALS) et en Arctique discutés ici ont été proposés lors de l'exercice de prospective Océan Atmosphère de Lille (2005). Ils se caractérisent à la fois par leur dimension régionale, leur identité très particulière et leur capacité à intégrer, au service d'enjeux de société, un ensemble de problématiques environnementales, économiques, sociales, politiques ou historiques. Si ces trois régions ont en commun une vulnérabilité particulière vis-à-vis du changement climatique, justifiant qu'on y mène une réflexion interdisciplinaire sur les impacts, la prévision et l'adaptation, les chantiers diffèrent par la nature et le positionnement des enjeux sur lesquels ils mettent l'accent. Si ce sont les priorités sociétales qui sont au cœur de la question des impacts dans AMMA, MISTRALS s'intéresse davantage à la vulnérabilité particulière de la région méditerranéenne, aux risques naturels auxquels elle est confrontée ainsi qu'à l'évolution de ses ressources face à une anthropisation croissante. Concernant l'Arctique, il s'agit surtout de renforcer les activités de recherche françaises dans une région où le changement climatique devrait se manifester de façon particulièrement aiguë. La définition d'enjeux autour des impacts apparaît prématurée dans le cadre de ce chantier qui doit auparavant construire son périmètre disciplinaire.

Engager la communauté nationale sur trois chantiers est ambitieux mais justifié, dans la mesure où ils serviront à catalyser à la fois le renforcement des compétences existantes, par une mise en commun des savoirs et des moyens, et l'émergence de nouvelles compétences, aux interfaces entre disciplines notamment. Néanmoins, pour réussir cet engagement, les moyens accordés à ces chantiers par les organismes devront être suffisants pour permettre la coordination des actions, à savoir éviter l'éparpillement qui se produirait si trop de moyens devaient être recherchés ailleurs (ANR, Europe, Région...). Il faudra aussi veiller à un ancrage fort de ces chantiers dans le paysage national et international.

## ■ Afrique de l'Ouest

L'Afrique de l'Ouest est une région particulièrement vulnérable en raison des fortes variabilités météorologique et climatique, d'une dépendance prépondérante des activités sociétales, comme l'agriculture pluviale, à ces variabilités et de capacités économiques ou institutionnelles souvent trop limitées pour permettre aux pays concernés de s'adapter aux conséquences du changement climatique. Cependant le climat n'est qu'un des facteurs environnementaux interagissant avec les dynamiques sociétales. La forte croissance démographique et le renforcement de l'exploitation intensive des ressources ont également un impact important sur l'évolution de l'environnement (modification des processus de surface et rétroaction sur la variabilité du système de mousson) qui rend l'accès à la ressource agricole encore plus difficile pour les populations, renforçant leur vulnérabilité vis-à-vis des aléas climatiques. La composante « climat » doit donc être

intégrée dans le cadre plus global de l'étude des changements environnementaux et sociétaux.

La phase 1 du programme international AMMA avait plusieurs objectifs : mieux connaître les mécanismes de la mousson africaine et son influence sur le climat aux niveaux local, régional et global ; relier la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest à ses impacts sur la santé humaine, les ressources en eau et l'agriculture et définir les stratégies de surveillance appropriées ; enfin, veiller à l'intégration de ces recherches dans les prévisions et prises de décision des nations concernées. Elle s'est donc concentrée sur la réalisation de campagnes de terrain, sur le démarrage de l'exploitation, en termes d'études de processus et de variabilité, des bases de données acquises lors de ces campagnes et sur le développement d'études sur les impacts socio-économiques de la variabilité de la mousson. Des efforts très importants ont été menés en termes de mise en place d'infrastructures d'observation, de mise en œuvre de nouvelles méthodes et moyens de prévision et de formation.

La phase 2 d'AMMA visera à :

- étudier la prévisibilité et améliorer la prévision et les systèmes d'alerte aux échelles météorologique, intra-saisonnière et climatique pertinentes pour les applications opérationnelles ;
- améliorer la compréhension du système de mousson à ces échelles, en incluant l'étude des cycles de l'énergie et de l'eau et en se focalisant sur les boucles de rétroaction essentielles, notamment avec la surface continentale en intégrant les effets des activités anthropiques (en particulier usage des sols et pollution urbaine) ;
- mieux prendre en compte les priorités sociétales qui seront organisées autour de sept thématiques transversales : ressources en eau, usage des terres et productivité, agriculture et sécurité alimentaire, santé, énergie, écosystèmes, zones urbaines et mégapoles africaines.

Parce qu'elle considère le climat comme un des facteurs environnementaux interagissant avec les dynamiques sociétales et qu'elle inclut les stratégies locales et les politiques publiques développées face aux changements climatiques, environnementaux et sociétaux, l'approche d'AMMA devient progressivement plus intégratrice. Il s'agira donc pour les communautés Océan Atmosphère et Surfaces et Interfaces Continentales de co-construire des projets avec d'autres communautés (par exemple Biologie, Écologie) autour des 7 questions transversales précédentes. Ces actions de recherche devront s'appuyer sur des observatoires pluridisciplinaires combinant données géophysiques, données socio-économiques issues notamment d'enquêtes de terrain et longues séries de données satellitaires. Des outils de modélisation géophysique, éco-hydrologique et socio-économique ainsi que des outils de régionalisation et de désagrégation numérique et statistique seront aussi nécessaires. Pour accompagner cette dynamique, les efforts devront être poursuivis en termes de formation et de renforcement des systèmes d'information régionaux.

En tant que leader de la phase 1 d'AMMA, la communauté française détient une forte visibilité internationale qu'il conviendra de consolider au cours de la phase 2. En complément de la construction scientifique de cette phase, il sera nécessaire, dans le cadre d'un Bureau de programme AMMA, de définir la contribution des différents organismes, autre que leur soutien aux Service d'observation en Afrique. Ce Bureau de programme AMMA devra aussi contribuer à établir des contacts avec les bailleurs de fonds en Afrique et les programmes internationaux sur les ressources en eau et la sécurité alimentaire.

## ■ Méditerranée

L'exercice de prospective Océan Atmosphère de Lille (2005) a fait émerger un projet de recherche sur le bassin méditerranéen dont le champ d'exploration a ensuite été approfondi et élargi. Sensible à cet élan, le CIO-Environnement a décidé de réaliser un grand chantier interorganisme. Le colloque d'Aix de novembre 2008 a ensuite permis de faire émerger les enjeux interdisciplinaires d'un tel chantier, baptisé MISTRALS. Le contexte a évolué en 2010, avec la mise en place d'un CIO MISTRALS, une gouvernance confiée au CNRS et à l'IRD, la nomination de deux directeurs et l'instauration de Comités d'évaluation thématiques. L'objectif est maintenant de construire une approche intégrée, c'est-à-dire d'inscrire les différents projets constitutifs du chantier dans une vision cohérente sur la durée, au sein de laquelle les questions de la société se déclinent en termes d'objectifs scientifiques et les avancées scientifiques produisent des informations utiles à la société. Cette démarche se traduit par deux objectifs complémentaires : améliorer la compréhension d'un certain nombre de processus et utiliser ces progrès pour développer une capacité prédictive répondant aux attentes de la société.

Les priorités scientifiques portées par la communauté Océan Atmosphère dans ce chantier se déclinent en 4 projets intégrés : HYMEX, CHARMEX, MERMEX et PALEOMEX. HYMEX vise à améliorer la compréhension et la modélisation du cycle de l'eau en Méditerranée, en particulier des phénomènes hydrométéorologiques extrêmes associés au cycle de l'eau aux échelles régionales et locales et dont la prévisibilité et l'évolution sont des questions majeures dans cette région. La phase d'observations intensives concernera la rive nord-ouest et sera essentiellement consacrée à des études portant sur le développement des événements convectifs extrêmes d'automne. CHARMEX s'intéresse aux états passés, présents et futurs de la composition chimique de l'atmosphère et à l'impact des aérosols naturels et anthropiques sur le climat régional. Un aspect novateur de ce projet concerne les aérosols organiques, peu étudiés jusqu'à présent. L'impact sur la photosynthèse de l'atténuation du rayonnement solaire incident par les aérosols atmosphériques et l'impact de leur dépôt sur les réservoirs de nutriments des eaux de surface sont des thèmes de réflexion communs à CHARMEX et MERMEX. Ce dernier fédère les recherches sur le fonctionnement des écosystèmes marins en Méditerranée dans le nord-ouest du bassin. Orienté sur les aspects biogéochimiques, il s'appuiera sur un réseau d'observations physiques, chimiques et biologiques pour suivre quantitativement les différents compartiments de la chaîne trophique, et sur des

opérations ciblées complémentaires (convection profonde, événements de crues, rôle des dépôts atmosphériques en lien avec CHARMEX). Quant au projet PALEOMEX, il vise à donner une dimension historique aux questions élaborées dans les projets précédents. Il a en effet pour ambition de construire une approche interdisciplinaire autour des événements abrupts de l'Holocène et de reconstruire la dimension historique humaine des crises ayant frappé le pourtour méditerranéen avec un focus sur les derniers deux mille ans. La modélisation intégrée allant du système physique au socio-système est au cœur de sa problématique.

La longue mise en place de MISTRALS s'étant traduite par un repli des projets intégrés sur eux-mêmes, l'instruction des questions transverses doit encore progresser. À l'intérieur même des projets, les liens entre campagnes intensives, réseaux d'observation à long terme, observation spatiale et modélisation demandent à être consolidés. Le pilotage de MISTRALS par un Bureau de projet assurant la coordination scientifique, institutionnelle et logistique ainsi que la construction de la dimension internationale du chantier devrait permettre de créer des opportunités d'échange d'idées et de développer des axes de recherche à l'interface des disciplines. Ce pilotage devra aussi permettre, dans les dix ans à venir, d'intégrer de nouvelles initiatives lorsque leur degré de maturité le permettra.

## ■ Arctique

Le changement climatique se manifeste de façon particulièrement aiguë en Arctique. Des perturbations importantes affectant l'ensemble des équilibres climatiques de la région y sont en effet déjà visibles. À terme, la diminution de la cryosphère marine et terrestre est susceptible de conduire le système climatique vers des points de non-retour. En outre, l'Arctique influence fortement le système climatique aux échelles globales, *via* les circulations océanique et atmosphérique et la contribution de la fonte de la calotte groenlandaise au niveau des mers, imposant une approche à la fois régionale et globale. Par ailleurs, les multiples enjeux environnementaux, économiques et sociétaux sont autant d'arguments pour aborder l'étude de l'Arctique avec une approche multidisciplinaire.

La France possède une longue histoire dans le domaine de la recherche polaire et la dernière Année polaire internationale a donné à la communauté scientifique française l'occasion de renforcer ses activités au travers de collaborations internationales dans lesquelles des équipes ont eu un rôle de leader ou ont apporté une compétence originale. Bien que la

recherche en région Arctique ne soit devenue que récemment une priorité, la communauté scientifique nationale a donc les compétences requises pour relever ce défi. Ce chantier est en outre une opportunité exceptionnelle pour structurer son action en Arctique. Cependant, considérant le caractère récent de cette initiative, l'interdisciplinarité ne pourra être abordée que lorsque les axes forts de la recherche en Océan Atmosphère dans cette région auront été identifiés.

Il est proposé de structurer la participation de la communauté Océan Atmosphère au chantier Arctique autour de thèmes de recherche identifiés comme prioritaires au sein de la communauté internationale, à savoir :

- l'évolution des interactions entre la calotte glaciaire groenlandaise, l'atmosphère et l'océan ;
- les forçages climatiques, les cycles des gaz à effet de serre, les cycles de l'eau et du carbone et leurs liens avec l'évolution du milieu physique (cryosphère, pergélisol) et chimique (aérosols, espèces réactives, métaux...);
- l'amplification du changement climatique en Arctique et son lien avec l'évolution de la cryosphère ;
- le rôle de l'Arctique dans la variabilité atmosphérique globale et ses impacts.

La reconstitution des climats passés à partir des archives est considérée comme un outil transverse à toutes ces problématiques.

Un autre élément de structuration de la contribution de la communauté Océan Atmosphère pourrait être d'identifier quelques zones spécifiques où développer une approche intégrée en collaboration étroite avec d'autres disciplines. La réflexion sur l'identification de ces zones clés reste ouverte et doit intégrer les contextes aussi bien historique (initiatives en cours ou programmées, domaines nationaux de compétence) que logistique et partenarial (par exemple UMI TAKUVIK), au plan national et international.

La mise en œuvre du chantier nécessitera de pérenniser le suivi de la variabilité en Arctique (mise en place de réseaux, validation des séries de mesures), de développer et mettre en œuvre de nouveaux outils (plateformes d'observation et modèles) et de s'investir dans des thématiques pour lesquelles la communauté nationale a des compétences particulières. Les priorités affichées en termes d'outils et de moyens sont :

- l'accès aux infrastructures polaires, en priorité à un navire de type brise-glace de la flotte internationale ainsi qu'aux moyens aéroportés capables de voler au-delà de 75°N ;

## Approche intégrée des changements environnementaux planétaires à l'échelle régionale

- le renforcement du potentiel humain, la communauté étant sous-dimensionnée pour être pleinement active dans les deux régions polaires ;
- la mise en place de financements dédiés *via* des appels d'offres sur l'Arctique.

Une harmonisation au niveau national entre les organismes de recherche et les opérateurs tels que l'IPEV est primordiale. Les partenariats européens devront être élargis pour permettre un meilleur accès aux moyens adaptés aux conditions polaires.

### ■ Antarctique

La France est l'un des acteurs majeurs de la recherche en Antarctique, notamment dans le domaine Océan Atmosphère. La raison de cette position est historique, liée en particulier au développement des activités scientifiques mises en œuvre au cours de la troisième Année polaire internationale en 1957-58. De nombreuses observations initiées à cette occasion perdurent toujours. Dans le domaine Océan Atmosphère, les axes de recherche des équipes françaises touchent des domaines variés : la chimie de l'ozone stratosphérique, la chimie du soufre, la capacité oxydante de l'atmosphère, la chimie de la neige, les interfaces cryosphère – atmosphère et cryosphère – océan, les paléoclimats et plus récemment l'océanographie côtière. L'implantation historique et la diversité des disciplines couvertes par ces équipes font que la France a acquis des compétences et un savoir-faire poussés

dans les techniques scientifiques adaptées aux conditions extrêmes de l'Antarctique. La station Concordia et le forage profond EPICA qui a permis de reconstruire l'évolution sur les derniers 800 000 ans de deux gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone et le méthane) en sont de bons exemples. Le soutien à la mise en œuvre des programmes de recherche polaire est assuré par l'IPEV, qui maintient notamment les bases subantarctiques et antarctiques permanentes françaises depuis les années 1950. Cette situation a conduit les équipes à s'investir majoritairement dans l'hémisphère sud.

L'expérience et les compétences acquises depuis des décennies en Antarctique par la communauté nationale Océan Atmosphère font qu'elle est aujourd'hui idéalement placée pour participer au chantier Arctique. Il est toutefois impératif que soit préservée sa capacité à jouer son rôle d'acteur majeur de la recherche en Antarctique.





# Moyens et ressources humaines

# Programmes nationaux

## ■ Le programme LEFE

Le dernier exercice de prospective (2005) avait fait émerger le programme national LEFE, constitué de 5 actions thématiques : Chimie atmosphérique (CHAT), Cycles biogéochimiques et ressources (CYBER), Évolution et variabilité du climat à l'échelle globale (EVE), Interactions et dynamique de l'atmosphère et de l'océan (IDAO) et Assimilation de données (ASSIM). Un premier bilan des recherches et du fonctionnement de ce programme a été fait et certains travaux ont été présentés lors d'un colloque à Brest en juin 2009 (<http://www.insu.cnrs.fr/co/lefe/colloque-bilan-lefe>).

Le bilan réalisé dans le cadre de cette prospective et l'évolution à la baisse du budget alloué à LEFE en 2009 et 2010 par la majorité des organismes partenaires ont amené la communauté à réfléchir à l'avenir de ce programme. Il ressort qu'il représente un outil essentiel de structuration de la communauté : il est indispensable pour rassembler les synergies interlaboratoires et favoriser l'émergence de projets d'envergure ayant un pilotage national. Cependant, la communauté regrette qu'il ne permette plus de financer à lui seul de grands projets à forte composante de terrain, qui doivent dorénavant s'adresser à l'ANR ou à l'Europe.

Au niveau programmatique, suite à la réflexion prospective, il est recommandé de remplacer, en l'élargissant, l'action ASSIM du programme LEFE par une nouvelle action MANU (Méthodes mathématiques et numériques) comprenant, associés à l'assimilation de données, l'aspect numérique de la modélisation, la quantification des incertitudes et les méthodes d'analyse. Cette action devra poursuivre le travail d'ASSIM en termes d'animation et de structuration de la communauté et de soutien aux projets innovants.

Il est également proposé d'associer les actions « Évolution et variabilité du climat à l'échelle globale » et « Interactions et dynamique de l'atmosphère et de l'océan » afin de favoriser la synergie des études de processus à différentes échelles. En effet, mieux décrire, simuler et comprendre, à l'échelle globale, régionale ou locale, les fluctuations et les évolutions de la météorologie, du climat ainsi que de l'état de l'atmosphère, de la surface continentale et du milieu marin, sur des échelles temporelles allant de l'intrasaisonnier au pluricentennal et au plurimillénaire, passe en grande partie par l'amélioration de

la compréhension à toutes échelles des processus et de leur représentation dans les modèles.

Il est aussi recommandé d'intégrer le GMMC (Groupe mission Mercator Coriolis) au programme LEFE pour que cette action plus applicative puisse bénéficier de synergies avec les autres actions de LEFE et enrichir le programme.

Le programme LEFE devra également favoriser l'émergence de projets à vocation instrumentale, soit par la création d'une action spécifique intégrant des cofinanceurs autres que les organismes directement impliqués dans le soutien à la communauté Océan Atmosphère, soit par l'affichage clair d'objectifs spécifiques dans les actions du programme.

Enfin, si certaines questions relatives aux interfaces peuvent être traitées dans le cadre du programme LEFE qui devra favoriser l'émergence de projets dans ce domaine, d'autres nécessiteraient sans doute d'être abordées dans le cadre d'un programme interdisciplinaire spécifique du CNRS.

Comme il est essentiel de maintenir une cohérence entre les priorités scientifiques affichées par les différents organismes financeurs et celles des programmes internationaux, il est suggéré d'organiser des réunions rassemblant les représentants français des comités internationaux, des membres des différentes instances nationales concernées et des représentants des organismes partenaires.

## ■ Le programme PNTS

Le Programme national de télédétection spatiale (PNTS) vise à développer l'utilisation de la télédétection spatiale pour l'étude de la Terre et de son environnement, à savoir de l'atmosphère, de l'océan, des surfaces terrestres et de la Terre interne (gravimétrie, interférométrie), voire pour des études en Sciences de l'Homme et de la Société (imagerie à très haute résolution). Programme clairement multidisciplinaire, il intéresse donc non seulement le CNRS-INSU et le CNES, mais aussi des organismes tels que Météo-France, l'INRA ou le BRGM.

Par ailleurs, le PNTS affiche clairement un caractère méthodologique en se situant thématiquement sur la préparation de futures missions ou le développement de nouvelles méthodes pour l'exploitation des données

spatiales existantes, l'utilisation de produits éprouvés issus de la télédétection spatiale n'en relevant pas. Au vu de ce positionnement, il est naturel que le CNRS-INSU et le CNES soient les plus gros contributeurs au budget du PNTS.

Parce qu'il favorise l'émergence de nouvelles idées, aussi bien dans le domaine du développement instrumental que dans celui de l'exploitation des mesures, le PNTS a toute sa place dans le dispositif de recherche national et bien que la tendance soit au développement de recherches à caractère applicatif, il devra garder une composante « recherche fondamentale » suffisamment importante.

## ■ Le programme GMMC

Au cours des dernières années, l'océanographie hauturière a franchi une étape en passant du développement de systèmes d'analyse et de prévision à leur mise en œuvre opérationnelle, puis à la distribution des résultats et à leur exploitation par la communauté scientifique. En France, le GMMC, qui peut être vu comme l'incubateur scientifique de l'océanographie opérationnelle française, a apporté une contribution décisive à cette évolution, d'une part en impulsant les actions nécessaires au développement de systèmes d'océanographie opérationnelle et d'autre part en consolidant les synergies entre la recherche amont et les applications. Une recherche amont est en effet indispensable pour maintenir au meilleur niveau possible les méthodes permettant une description intégrée de l'océan, du large à la côte.

En tant que structure d'animation scientifique, le GMMC a soutenu des projets de recherche au cours de la période 2006-2010, dont certains en partenariat renforcé avec les équipes opérationnelles. Ces projets étaient dédiés par exemple à la production de ré-analyses océaniques couvrant les 20 dernières années (GLORYS), à la modélisation de l'océan global au 1/12° (DRAKKAR), à la modélisation régionale de la Méditerranée (SIMED) ou encore à l'intégration de la biogéochimie dans les systèmes opérationnels (MERCATOR-VERT). Par ailleurs, la communauté scientifique s'est positionnée comme utilisateur privilégié des produits de l'océanographie opérationnelle, notamment au travers des ré-analyses océaniques et des jeux d'observation retraités pour l'étude de la variabilité climatique de l'océan.

Au niveau européen, la France a pris des responsabilités de premier plan dans le Marine core service du programme GMES, en particulier avec la coordination par Mercator Océan du projet MYOCEAN (2009-2012) au sein duquel la composante recherche joue un rôle essentiel en synergie avec le GMMC.

Depuis 2009, le périmètre du GMMC a été élargi au domaine côtier, afin d'accompagner le développement de l'océanographie côtière opérationnelle (SNOCO) qui constitue un défi majeur pour les prochaines années. Dans les années qui viennent, le GMMC devra favoriser les recherches sur l'optimisation des systèmes d'observation, notamment pour la zone côtière, les couplages hauturier – côtier, la modélisation de l'apport des bassins versants et les couplages océan – vague – atmosphère.

# Services et moyens nationaux, développement technologique

## ■ Services nationaux

### • États des lieux

En sciences de l'Univers, les observations régulières des milieux naturels menées sur de longues périodes sont incontournables, tant pour la recherche fondamentale, afin de comprendre les mécanismes fondamentaux du fonctionnement de chacun des milieux naturels, prévoir leur évolution à différentes échelles de temps et construire des modèles qui devront assimiler des données fiables, que pour répondre à des missions de service public, ces observations constituant le fondement des prévisions si utiles à la société.

Dans ce contexte, le CNRS-INSU labellise et maintient, le plus souvent au sein des Observatoires des sciences de l'Univers (OSU), avec ses partenaires différents types de services nationaux :

- des Services d'observation pour récolter des données sur le long terme afin de produire des séries temporelles de divers paramètres atmosphériques et océaniques précieux pour les études de variabilité ;
- des Codes numériques communautaires pour faire évoluer les modèles numériques et les garder ainsi au meilleur de la connaissance ;
- des Sites instrumentés pour réaliser des mesures en routine de paramètres d'intérêt ainsi que des expériences dédiées de plus courte durée ;
- et des Centres de traitement et d'archivage des données pour créer et distribuer de nouveaux produits à partir de données satellitaires existantes.

La mobilisation de la communauté a permis le maintien et le développement de ces services dont la qualité est régulièrement expertisée. Bon nombre d'entre eux sont intégrés dans des réseaux européens ou internationaux.

### *Services d'observation*

Argo France	Activités françaises associées au réseau international Argo de mesures physiques <i>in situ</i> de l'océan à partir de flotteurs profileurs autonomes et à son extension vers les mesures biogéochimiques
CESOA	Cycle atmosphérique du soufre en relation avec le climat aux moyennes et hautes latitudes sud
IDAF	Composition chimique de l'atmosphère et des dépôts en Afrique, partie du réseau international IGAC-DEBITS
MEMO	Mammifères échantillonneurs du milieu océanique
MOOSE	Masses d'eau, circulation thermohaline et flux de matière en Méditerranée Nord occidentale
IAGOS	Composition de l'atmosphère (ozone, vapeur d'eau...)
NDACC	Composition chimique de la stratosphère et de la haute troposphère, notamment concentration d'ozone
OISO/CARAU	Carbone océanique dans l'océan Indien et l'océan Austral
ORA / Photons	Propriétés optiques et microphysiques des aérosols en chaque point du réseau international AERONET
PAES	Pollution atmosphérique à l'échelle synoptique
PIRATA	Variabilité climatique du couplage océan – atmosphère en Atlantique tropical
ICOS	Flux des principaux gaz à effet de serre en Europe
ROSAME	Niveau de la mer en régions subantarctique et antarctique

SOMLIT	Milieu littoral
SSS	Salinité de surface des océans

### Codes numériques communautaires

CHIMERE	Modélisation de la pollution atmosphérique
MÉSO-NH	Modélisation à moyenne échelle de l'atmosphère
MEMO	Modélisation de la dynamique et de la biogéochimie de l'océan et de la glace de mer
SIROCCO	Modélisation de l'océan côtier

### Sites instrumentés

CO-PDD	Observations atmosphériques sur le site de Cézeaux - Opme - Puy de Dôme (qualité de l'air et recherche sur le climat)
SIRTA	Téledétection active et passive de l'atmosphère

### Centre de traitement et d'archivage des données

CTOH	Topographie des océans et de l'hydrosphère
------	--

Fin 2010, les Services nationaux labellisés par le CNRS-INSU étaient au nombre de 22 : 15 Services d'observation, 4 Codes numériques communautaires, 2 Sites instrumentés et 1 Centre de traitement et d'archivage des données.

Outre ces services nationaux labellisés, des Centres thématiques et de données pluriorganismes gèrent et facilitent l'accès aux données spatiales dans le domaine de l'atmosphère et fournissent une expertise (ICARE, ETHER et STAMOS). Dans le domaine de l'océan, le Centre Coriolis assure la distribution des observations océaniques *in situ* mondiales, pour la recherche sur le climat et les besoins opérationnels, dans un contexte de forte intégration européenne (GMES) et internationale.

### Centres thématiques et de données

ICARE	Interactions aérosols, nuages et rayonnement et cycle de l'eau
ETHER	Chimie atmosphérique
SATMOS	Météorologie et environnement

Depuis la dernière prospective, de nouvelles infrastructures pilotées par l'Alliance pour l'environnement AIIEnvi ont été créées : les Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement (SOERE) qui mettent en réseau des observatoires de l'environnement déployés sur différents sites.

## • Recommandations

Dans ce nouveau contexte de création des SOERE, qui pourrait conduire à une dilution des responsabilités, la capacité d'assurer le suivi à long terme de paramètres essentiels

à la compréhension de la variabilité du système océan – atmosphère doit demeurer une priorité fondamentale. Il est donc important de rappeler quelques règles et d'émettre des recommandations destinées à assurer le bon fonctionnement des Services nationaux et à préserver la motivation de leurs acteurs.

Ainsi, la contractualisation entre organismes et porteurs de services devra être renforcée et prendre la forme d'un document exhaustif signé par les différentes parties au moment de la labellisation. Dans ce document, le périmètre précis du service devra être établi ainsi que ses moyens de fonctionnement, en distinguant les moyens pérennes fournis par les organismes (ressources humaines et matérielles) des moyens complémentaires plus limités dans le temps (par ex. campagnes). Par ailleurs, le CNRS-INSU devra être actif dans le processus de négociation avec les universités sur la mise à disposition des moyens universitaires pour les activités d'observation au sein des OSU, la question du statut et du nombre de personnels CNAP étant à cet égard fondamentale. Ce dialogue devra ensuite être poursuivi tout au long de la période d'activité du service, en particulier à l'occasion de la jouvence des instruments ou de la modification des périmètres qui pourront s'avérer nécessaires (intégration de nouveaux paramètres, utilisation de nouvelles méthodes, maintien des services analytiques associés).

Lors de la création ou du renouvellement de services, les priorités scientifiques définies lors des exercices de prospective et le

contexte européen et international devront être pris en compte. En outre, la question de la pérennisation, documentation et accessibilité des données, qui se pose à la fois pour les gros volumes de données issues des observations spatiales et des modèles et pour les données issues d'observations de nature plus diversifiée et complexe, devra être étudiée en priorité.

Concernant les Sites instrumentés, il est rappelé que ce sont des outils au service avant tout de la communauté (mise en œuvre de programmes de recherche ou d'activités d'observation), que le critère majeur devant conduire à leur labellisation doit être l'accueil d'équipes extérieures au site et que les choix stratégiques qu'ils opèrent doivent être compatibles avec ceux des Services d'observation qu'éventuellement ils hébergent. Pour les Codes communautaires, dont les efforts de convergence vers une plateforme commune devront être encouragés, le critère principal de labellisation est leur exploitation par une large communauté d'utilisateurs, allant au-delà du cercle restreint des développeurs du laboratoire hôte. Enfin, il est recommandé à chacun des Centres thématiques d'intégrer à leurs bases des données *in situ* issues de Services d'observation, de développer un portail commun d'accès aux données spatiales et à ces données *in situ*, de mettre en place des comités pour sélectionner les produits à développer ou à améliorer (type de paramètres et traitements appropriés) et en faciliter l'accès, et de recenser à la fois les utilisateurs de ces produits (visibilité à l'international) et les résultats scientifiques obtenus grâce à eux.

Concernant la mise en réseau éventuelle des Services d'observation, *via* par exemple un SOERE, celle-ci devra impérativement conduire à une réelle valeur ajoutée en termes de complémentarité, standardisation et qualité des données ainsi qu'en termes de logique de fonctionnement.

Enfin, il est fondamental de consolider le socle national des services qui ont atteint le niveau de l'agrégation européenne. Pour susciter et réussir de nouvelles intégrations, en particulier à GMES, la communauté scientifique et les organismes devront réaliser au préalable une analyse des forces, des faiblesses et finalement des besoins à l'échelle européenne, afin d'identifier les domaines où la communauté nationale sera en mesure et devra affirmer son leadership.

## ■ Moyens nationaux

Les moyens nationaux mis en place par le CNRS-INSU et ses partenaires, que sont d'une part les moyens de navigation océanographique et aérienne, de carottage et d'analyse des échantillons et d'autre part les moyens de calcul intensif et de stockage et diffusion des données, sont essentiels

à la réalisation des projets et devront être maintenus sinon renforcés. La communauté recommande donc que le CNRS-INSU poursuive son soutien aux moyens nationaux et que les organismes réfléchissent avec l'ANR à la mise en place de nouveaux mécanismes de financement permettant d'assurer la pérennisation de ces moyens.

Parmi les évolutions récentes, deux nouvelles structures nationales ont été créées.

Dans le domaine des moyens à la mer, un Centre national de mise en œuvre de gliders a été créé en 2007 à La Seyne-sur-Mer par le CNRS-INSU et l'Ifremer. Coordonné par la Division technique du CNRS-INSU (DT), il a pour mission la préparation des instruments (ballastage, calibration, changement des piles...), l'optimisation du pilotage de flottilles, le suivi des missions en mer (transport, douane, déploiement et récupération), la maintenance (mécanique, électronique et logiciel), le maintien des infrastructures de communication, la gestion des charges utiles et la R&D. Depuis lors, il a notamment accompagné l'intégration de capteurs de biogéochimie marine sur les 12 gliders actuellement opérationnels.

Dans le domaine du carottage, les plateformes ont été mutualisées au sein d'une structure nationale pluriorganisme dénommée C2FN (Centre de carottage et de forage national), regroupant tous les personnels techniques du forage-carottage et s'appuyant sur les laboratoires concernés. Créé en 2009, le C2FN comporte 4 cellules : forage-carottage glaciaire, forage-carottage continental, carottage océanique et instrumentation. Depuis 2009, le C2FN a travaillé à la refonte et à l'amélioration du carottier géant « Calypso » sur le Marion Dufresne, à la rénovation des chambres froides de Grenoble et à la remise à niveau du système de forage continental (acquisition d'une barge, de carottiers et de la logistique associée : camion, containers et zodiac).

## ● Flotte océanographique

### État des lieux

La Très grande infrastructure de recherche « Flotte océanographique française » (TGIR FOF), dont la gouvernance est organisée *via* l'unité mixte de service FOF créée en 2010 et regroupant les opérateurs des navires océanographiques français (CNRS-INSU, Ifremer, IPEV et IRD), devrait permettre une gestion coordonnée de ces navires. L'UMS est prioritairement au service de la communauté scientifique et a pour missions principales d'établir un plan d'évolution de la flotte, d'estimer les investissements annuels nécessaires à l'équipement des navires et d'élaborer et mettre en œuvre la programmation annuelle intégrée des navires et des équipements lourds associés.

Les navires de la Flotte océanographique française sont utilisés pour des mesures en mer par différentes communautés scientifiques. Pour la communauté Océan Atmosphère, les besoins concernent les domaines suivants : l'étude des processus océaniques en physique et biogéochimie, l'étude des interactions océan – atmosphère, la paléo-océanographie, l'étude de l'interface glace – océan, les études pluridisciplinaires en zones côtière et littorale, la formation, l'enseignement et la maintenance des Services d'observation pour le suivi à long terme du climat et l'océanographie opérationnelle.

### Actions prioritaires

Les financements alloués au fonctionnement des navires des flottes hauturière et côtière ont connu récemment une baisse drastique. En conséquence, des frais de bords sont depuis lors réclamés à certaines campagnes hauturières évaluées positivement par les comités *ad hoc*, dont les montants sont si élevés qu'ils nécessitent d'être recherchés auprès de l'ANR ou de l'Europe sans assurance de les obtenir. Dans ce contexte, la flotte hauturière pouvant en outre être affrétée par des compagnies privées, la communauté demande qu'un quota de jours de bateau permettant la réalisation de l'ensemble des campagnes évaluées positivement soit réservé aux projets scientifiques et financé en totalité par l'UMS FOF. Pour la flotte côtière, des financements complémentaires sont également demandés aux campagnes sous la forme d'un ticket modérateur. Bien que favorable à ce principe, la communauté estime que ce ticket modérateur a beaucoup trop augmenté et demande qu'il soit revu à la baisse.

Les procédures d'évaluation et de programmation des campagnes océanographiques hauturières sont complexes et quelquefois incohérentes. Pour les simplifier et les rendre plus efficaces, la commission d'évaluation devrait tenir compte des évaluations scientifiques réalisées dans le cadre d'autres instances (LEFE, PNTS, ANR, Europe...) et se focaliser sur la

faisabilité technique des campagnes. Elle pourrait ainsi devenir un acteur majeur de la programmation de ces campagnes. Pour la flotte côtière, dont les utilisations sont plus variées (recherche, enseignement...), ce qui peut nécessiter une forte réactivité, il faudrait maintenir la relative souplesse de la procédure actuelle d'attribution de temps bateau.

Pour mettre en œuvre les priorités scientifiques identifiées lors de cette prospective, la communauté doit pouvoir s'appuyer sur une flotte diversifiée, performante et accessible. Compte tenu de la configuration actuelle de la flotte, cela va nécessiter au minimum de :

- maintenir un vecteur permettant les carottages longs, en particulier moderniser sans tarder celui du Marion Dufresne II ;
- anticiper les besoins grandissants de la communauté nationale en terme de temps de campagne à la mer dans les domaines côtier et littoral, sachant qu'elle devra à la fois mener des études pluridisciplinaires de recherche fondamentale, poursuivre des actions de formation et répondre à des sollicitations croissantes concernant des missions d'intérêt public liées par exemple à la directive cadre stratégique pour le milieu marin ;
- réfléchir au remplacement de l'Antéa et du Suroit, sous-utilisés car inadaptés à des degrés divers à certaines missions semi-hauturières, sachant que la mise en œuvre d'un seul navire moderne semi-hauturier, de la taille du Suroit et conçu pour accueillir des équipements pluridisciplinaires suffirait à couvrir les besoins ;
- permettre à la communauté scientifique nationale d'accéder à un brise-glace et de déposer des plateformes instrumentales sur la glace, par voie aéroportée depuis la côte ou un navire ;

Navires hauturiers		Navires côtiers	
Pourquoi pas ?	Ifremer	L'Europe	Ifremer
Atalante	Ifremer	Thalia	Ifremer
Thalassa	Ifremer	Gwen-Drez	Ifremer
Le Suroit	Ifremer	Haliotis	Ifremer
Marion Dufresne	IPEV - TAAF	Téthys 1	CNRS-INSU
Astrolabe	IPEV - TAAF	Côte de la Manche	CNRS-INSU
Curieuse	IPEV - TAAF		
Alis	IRD		
Antéa	IRD		

*Les navires océanographiques hauturiers et côtiers français et leurs opérateurs. L'Alis et l'Antéa sont éligibles à tous les appels d'offres, qu'ils soient hauturiers ou côtiers.*

- répondre aux besoins non couverts dans le Pacifique Ouest par l'Alis, en raison de sa capacité limitée pour les travaux hauturiers, en permettant à la communauté scientifique d'accéder à un navire de classe régionale (40-50 m) *via* des procédures d'échange de temps navire avec les opérateurs européens, internationaux et/ou d'affrètement ;
- maintenir en conditions opérationnelles les navires de station qui jouent un rôle de plus en plus important dans les activités récurrentes de recherche, d'observation, d'enseignement et de maintenance des Sites instrumentés en milieu côtier.

## • Flotte aéroportée

### État des lieux

Réunie dans l'unité mixte de service SAFIRE, la flotte aéroportée est composée d'un Falcon 20, jet capable de voler jusqu'à la tropopause, d'un ATR 42, turbopropulseur de plus grand emport mais limité à des altitudes voisines de 7 km, ainsi que d'un Piper Aztec, aéronef de petite taille.

Cette flotte aéroportée a été impliquée dans de nombreuses campagnes de mesure qui ont permis aux laboratoires français d'être présents à un bon niveau dans les grands programmes de recherche internationaux en sciences de l'atmosphère. Les thématiques abordées ont été principalement la dynamique atmosphérique, les aérosols et leurs effets sur le bilan radiatif de l'atmosphère et sur la formation des nuages, les propriétés des noyaux glaciogènes, et les émissions chimiques et leur transformation. Des vols ont par ailleurs été consacrés à la calibration / validation d'instruments spatiaux dont les données ont ensuite été largement exploitées au sein de la communauté.

Ces campagnes ont bénéficié d'investissements importants en termes d'équipement instrumental. Toutefois, le financement reste insuffisant en ce qui concerne la modernisation des instruments ayant démontré leur intérêt scientifique (fiabilisation, miniaturisation) et l'adaptation de nouvelles techniques de mesure.

Le système actuel de tarification des heures de vol distingue les heures de vol financées par les partenaires de SAFIRE de celles supportées par d'autres organismes, les premières étant moins coûteuses que les secondes. En outre, il exige que la quote-part de chaque organisme financeur dans le financement de ces heures de vol reflète sa quote-part dans le financement global des projets de recherche concernés. Dans un contexte de montage de projet où la structure finale du budget est rarement connue *a priori*, cet équilibre est très difficile à atteindre et le coût des heures de vol finit donc par être négocié. En conséquence, la communauté demande que

les tutelles de SAFIRE définissent un système de tarification plus simple.

### Actions prioritaires

Le choix d'un parc de trois avions complémentaires s'est avéré être un bon compromis entre capacités, souplesse et coûts. Cependant, la faible autonomie des avions (3 à 4 heures de temps de mesure en vol au maximum) est devenue une limite importante. En effet, la tendance actuelle est d'utiliser les moyens aéroportés pour sonder de grandes régions, ce qui conduit à des plans de vol très complexes nécessitant de longs temps de vol. L'accès à des avions à plus long rayon d'action doit donc être une première priorité. Des solutions sont à rechercher, dans un premier temps à l'échelle européenne dans le cadre du programme EUFAR dont le rôle important doit être préservé.

Par ailleurs, mais dans une moindre mesure, la capacité d'emport des porteurs français (notamment du Falcon 20) constitue une limitation au vu de l'augmentation, ces dernières années, du parc instrumental. Le développement de compartiments auxiliaires sous voilure (« Pod ») constitue un élément de solution à envisager.

Un effort de miniaturisation et de réduction de la consommation énergétique des appareils scientifiques embarqués doit aussi être entrepris, les gains dans ce domaine étant potentiellement très importants.

Enfin, l'accès à la très haute altitude demandé par certains chercheurs devrait être satisfait par exemple *via* des coopérations avec la Russie (Geophysika) ou les États-Unis (Global hawk).

Actuellement en plein développement, le drone est une technique prometteuse de mesure en altitude. Elle pourrait notamment être très utile lorsque des incidents naturels ou industriels empêchent les aéronefs habités d'accéder à des espaces aériens scientifiquement intéressants. En outre, ce type d'engins pourrait un jour être opéré en flottilles et donc déployé plus massivement et ce, à des coûts inférieurs à ceux des avions. Il semble donc nécessaire que soit rapidement réalisée une évaluation des potentialités ouvertes par ces nouveaux porteurs et des modifications des appareils scientifiques embarqués que leur utilisation impliquerait.

## • Ballons

### État des lieux

En France, les ballons sont du ressort du CNES qui est l'un des rares opérateurs au monde à maîtriser toute la filière, de la

conception de nouveaux véhicules aux opérations de lâcher, et ce pour toutes les régions du globe.

Dans le domaine de l'atmosphère, les ballons sont utilisés pour couvrir une grande variété de thèmes d'étude : phénomènes dynamiques, transport, échanges océan – atmosphère, composition chimique, microphysique, climat et validation satellitaire. Ils sont généralement considérés comme un vecteur scientifique abordable, par rapport aux avions destinés aux vols à haute altitude.

Depuis la dernière prospective, un accord a été conclu entre le CNES et le CNRS-INSU qui a conduit à la création d'une instance d'évaluation des projets de recherche utilisant les ballons du CNES : le Comité scientifique et technique pour les ballons (CSTB).

Ces dernières années, les règles de sécurité se sont progressivement durcies, réduisant de façon drastique les possibilités de vol (seule la base d'Esrange située à haute latitude en Scandinavie est actuellement opérationnelle) pour la plus grande insatisfaction des scientifiques concernés. Ceci a amené le CNES à revoir en profondeur la technologie ballon afin d'assurer une sécurité maximale aux futurs vols. Cela concerne aussi bien l'ensemble des techniques de vol (lancement, suivi du vol, communication et prévision du point d'atterrissage), que les nacelles et ballons (fiabilité, configuration...).

La consultation de la communauté scientifique européenne par le CNES et le CNRS-INSU a montré que même en tenant compte les problèmes drastiques de sécurité, la solution ballon est encore possible pour des projets scientifiques et que les communautés concernées sont soucieuses de nouveaux développements. Une feuille de route pour les activités futures a ainsi pu être définie.

### **Actions prioritaires**

Les vols de ballons stratosphériques du CNES sont suspendus jusqu'à la qualification de la nouvelle nacelle de servitude opérationnelle Nesyka, dont la disponibilité à partir de 2013 est un prérequis indispensable au futur programme ballon.

La mise en place de bases opérationnelles de lancement aux latitudes moyennes et équatoriales, y compris pour des vols emportant des charges lourdes, constitue une première priorité. Il existe de très sérieux espoirs de pouvoir disposer de sites adaptés à moyenne latitude à la frontière sud du Canada. En revanche, un effort devra être entrepris pour établir un site opérationnel de lancement au voisinage de l'équateur.

La communauté a exprimé le besoin de vols de longue durée pouvant emporter des charges utiles plus lourdes que celles

utilisées jusqu'à présent. Le développement de ballons stratosphériques ouverts de moyenne durée (quelques jours) ou de longue durée (quelques semaines) doit donc être considéré comme une autre priorité.

Enfin, pour permettre de nouvelles avancées scientifiques, le « programme ballon » de la prochaine décennie devra prévoir des développements utilisant les technologies les plus avancées, aussi bien côté instrumentation scientifique embarquée que côté ballon, ainsi que la réalisation de quelques « projets ballon » de grande envergure. Les sources de financement qui devront être mises en place pour ce programme nécessiteront la contribution d'agences autres que le CNES et le CNRS-INSU, en particulier la montée en puissance des coopérations internationales.

## **• Calcul intensif**

### **État des lieux**

La communauté Océan Atmosphère est une des principales utilisatrices des grands centres de calcul scientifique, tout particulièrement dans le domaine de la simulation climatique dont les progrès scientifiques sont fortement conditionnés par la disponibilité des ressources informatiques. Or les grands centres de calcul français sont très loin d'être surdimensionnés. Ainsi, lors des exercices d'intercomparaison, les modèles de climat français tournent régulièrement à des résolutions spatiales plus basses que les modèles de pays comparables.

Cependant, les moyens de calcul intensif français ont été restructurés début 2007 avec la création du GENCI, une société civile qui coordonne dorénavant les trois centres nationaux de calcul intensif pour la recherche : le CCRT du CEA, l'IDRIS du CNRS et le CINES des universités. L'action du GENCI a permis de remonter la puissance de calcul disponible pour la recherche publique française au niveau de celle des grands pays européens et d'unifier la procédure d'attribution des heures de calcul. La capacité totale installée fin 2010 dans les trois centres nationaux était de 600 Tflops, soit une croissance d'un facteur 30 en trois ans. Le MESR s'est doté, également début 2007, du Comité stratégique du calcul intensif (CSCI) chargé d'auditer les moyens de calcul disponibles et de formuler des propositions quant à leur organisation, leur renouvellement et leur utilisation optimale, en tenant compte des besoins de la communauté scientifique, afin d'aider au maintien des moyens de calcul nationaux au niveau de l'état de l'art international. Enfin, le CNRS a lui aussi réorganisé, il y a quelques mois, son organe de supervision de l'informatique lourde avec la mise en place du Comité d'orientation pour le calcul intensif (COCIN), au sein duquel le CNRS-INSU a une représentation.

Cette évolution positive de la capacité de calcul pure implique cependant de nouvelles contraintes. Par exemple, le GENCI a choisi de renoncer progressivement au calcul vectoriel en raison de la quasi disparition de l'offre industrielle vectorielle et de l'émergence, dans tous les domaines scientifiques, de codes fortement parallélisés, même dans celui de la modélisation du climat couplé dont le code est pourtant notoirement difficile à paralléliser. Autre exemple : parce qu'elle conduit à une plus grande masse de données à traiter, l'amélioration des résolutions liée à la plus grande vitesse de calcul met une pression de plus en plus grande sur les infrastructures périphériques des centres qui assurent l'archivage et la transmission des données. L'IDRIS et l'infrastructure RENATER, qui sont d'une utilité déterminante pour le développement des recherches en Océan Atmosphère, vont donc devoir se développer en tenant compte des apports, en terme d'archivage et d'analyse des données, des centres régionaux de calcul.

### Recommandations

La recommandation principale de la communauté Océan Atmosphère est que le CNRS et le CNRS-INSU aient une politique davantage proactive dans ce domaine. Le CNRS doit agir en partenaire moteur du GENCI en maintenant à un haut niveau sa représentation au sein des instances directrices de la société civile, en termes aussi bien de présence aux réunions que de préparation des dossiers, afin de pouvoir y défendre notamment les priorités de la recherche de la communauté Océan Atmosphère. De son côté, le CNRS-INSU pourrait mettre en place une prospective continue en calcul intensif.

La communauté appuie fortement le renouvellement des machines de l'IDRIS, lequel doit se faire dans un souci d'optimisation du parc des machines par rapport à la diversité des besoins. Cependant, afin de garantir cette bonne adéquation entre besoins et moyens, elle préconise d'assurer, de façon homogène dans tous les comités d'usagers (IDRIS, CCRT, CINES), la présence d'utilisateurs effectifs des machines.

De manière plus concrète et immédiate, la communauté recommande que la machine parallèle IBM-SP de l'IDRIS (Vargas), perçue par ses chercheurs comme la cheville ouvrière du calcul intensif de classe nationale au CNRS, fasse l'objet d'une politique de renouvellement ambitieuse et structurée à moyen terme, ce renouvellement devant être prioritaire par rapport au soutien à la machine massivement parallèle IBM Blue Gene/P de l'IDRISS (Babel), une machine du même type étant disponible au niveau européen (Jugene de PRACE). En effet, même si l'architecture massivement parallèle à plusieurs milliers de cœurs commence à être utilisée par la communauté pour la modélisation du climat couplé, elle restera mal adaptée,

même à moyenne échéance, à certaines utilisations telles les simulations climatiques très longues.

## ■ Développement technologique

### • État des lieux

L'observation du Système Terre, de ses compartiments et des échanges à leurs interfaces, la mise en place de campagnes de terrain ambitieuses, le développement d'expériences de laboratoire novatrices exigent un arsenal expérimental performant, adapté et bénéficiant des derniers progrès technologiques. Les activités liées aux développements de nouveaux capteurs et porteurs sont donc essentielles, d'autant que le plus souvent les instruments nécessaires n'existent pas dans l'industrie.

Les unités de recherche sont le lieu privilégié du développement instrumental car des liens entre développeurs et utilisateurs peuvent naturellement s'y créer. Ce lien est crucial et doit être préservé. Cependant, la Division technique du CNRS-INSU a elle aussi un rôle d'accompagnement essentiel. Elle apporte en effet un support technique à la fois diversifié et de haut niveau, ce qui permet de compenser les déficits en personnel technique de certaines unités et fait d'elle un des acteurs majeurs du développement technologique. Sans la DT, un grand nombre d'innovations n'auraient pu aboutir (diodes laser pico-SDLA, CESAM, marégraphes...).

### • Perspectives et besoins

Les communautés qui étudient l'océan, l'atmosphère ou leurs interfaces s'accordent sur le besoin de réaliser des observations en des points fortement disséminés et souvent durant de longues périodes. À ce titre, la télédétection spatiale qui produit de l'information multidimensionnelle est une source d'information irremplaçable, mais elle n'est pas suffisante. Il s'agira donc de poursuivre le développement de capteurs *in situ* « portables » (c'est-à-dire miniaturisés, « intelligents », énergétiquement autonomes, équipés de moyens de communication plus performants et programmés pour la transmission en temps réel), leur adaptation sur des porteurs poly-instrumentés, ainsi que la mise en réseau de ces capteurs (réseau Argo...) et/ou porteurs.

Concernant les porteurs, il s'agira de spécifier et adapter, voire concevoir, des plateformes autopilotées - ou pilotées à distance - fiables, capables de porter des instruments et de les mettre en opération : engins aériens (drones, dirigeables), nautiques (engins téléguidés de surface) ou sous-marins (AUV, gliders, VMP).

Des enjeux technologiques majeurs et innovants sont à relever pour atteindre ces objectifs.

Pour les sciences de l'atmosphère, les efforts devront porter notamment sur :

- l'amélioration de la compacité et de la sensibilité des instruments de mesure *in situ* ;
- le développement de nouveaux instruments permettant la mesure simultanée de la nature et des concentrations d'espèces chimiques et de l'état physique de l'atmosphère ;
- le développement de nouvelles techniques très sensibles de spectroscopie optique (CRDS, CEAS, peigne de fréquence...) ;
- le développement de technologies de spectrométrie de masse pour la détection de nouvelles molécules qui se seront révélées des traceurs spécifiques de certaines sources de pollution ou de processus ;
- le développement d'outils permettant le suivi en continu dans l'atmosphère des profils de concentrations et de flux de gaz et des paramètres physiques associés, notamment aux interfaces couche limite – troposphère libre (mesures directes et à distance de flux turbulents de CO<sub>2</sub>...).

Pour l'océanographie, il s'agira notamment de :

- développer et généraliser l'utilisation de capteurs à base de puces ARN/ADN, capables de détecter rapidement de très faibles seuils de pollution locale *via* les réponses génétiques d'organismes modèles ou de détecter les modifications de peuplements d'espèces par le suivi de groupes déterminés, même s'ils sont présents sous forme de trace ;
- développer des capteurs *in situ* à déployer sur les observatoires sous-marins et/ou des porteurs / vecteurs : capteurs (électro)chimiques de mesure des concentrations en nutriments dissous (nitrates, silicate et phosphate), analyseurs chimiques des éléments chimiques en trace et des isotopes, spectromètres de masse pour la caractérisation des dépôts métallifères et capteurs de mesure de flux hydrothermaux ;
- développer de nouvelles générations d'appareils optiques et des logiciels de traitement d'images performants et adaptés, pour le comptage des particules inertes et vivantes (cytométrie en flux, flowcam, zooscan...) ;
- adapter des capteurs optiques sur des flotteurs / profileurs (chlorophylle, sels nutritifs, phytoplancton, conductivité, oxygène, pCO<sub>2</sub>...).

Pour les mesures faites depuis l'espace, il s'agira de :

- favoriser l'émergence de techniques permettant, à partir des observations de la couleur de l'océan, de déterminer non plus seulement la concentration en chlorophylle mais aussi les groupes phytoplanctoniques, la distribution des tailles des particules, les substances dissoutes... ;
- développer un instrument exploitant l'interférométrie et l'effet Doppler pour restituer à très haute résolution des informations multiples sur la surface de l'océan : altimétriques (topographie dynamique), cinématiques (vitesses et gradients en surface) et géométriques (rugosité) ;
- accompagner la préparation des nouvelles missions spatiales, en particulier IASI-NG sur METOP (mesure de la température, de la vapeur d'eau, des constituants atmosphériques qui absorbent dans l'infrarouge thermique, des caractéristiques des nuages et des aérosols, de l'émissivité et de la température des surfaces) et 3MI sur EPS-SG (mesure des propriétés des aérosols) ;
- continuer à réfléchir aux moyens de mesure possibles de la qualité de l'air et de la pollution à partir de plateformes géostationnaires ;
- mener une activité de R&T dynamique sur les méthodes actives, en particulier lidar, afin de préparer les capteurs embarqués du futur qui devront pouvoir réaliser des mesures sur des objets très variés, allant des gaz à effet de serre à la végétation en passant par les nuages et les aérosols.

La collaboration avec des chercheurs d'autres disciplines devra être renforcée ce qui permettra de bénéficier de nouvelles techniques en usage dans d'autres disciplines et de les adapter plus facilement aux thématiques et environnements de la communauté Océan Atmosphère. Très clairement, l'émergence d'un programme spécifique interorganisme permettrait de :

- concilier davantage développement technique et demande scientifique ;
- donner un cadre à de futurs contacts en amont avec des PME ou des écoles d'ingénieurs ;
- assumer explicitement la prise de risque inhérente au développement technologique.

La dissémination des développements techniques vers d'autres chercheurs ou laboratoires que ceux à l'origine du développement est insuffisante car la production, même en petite série, reste difficile. En effet, le passage du prototype

à l'instrument pouvant être dupliqué, puis à la petite série, nécessite un processus semi-industriel comprenant, entre autres, une étude de marché, l'établissement d'une documentation spécifique sur les différentes parties de l'instrument et le suivi d'une logique de reproductibilité de chaque sous-ensemble. Or, cette compétence n'est pas du ressort des laboratoires qui devraient donc s'appuyer sur la DT en amont de ce processus, mais il faudrait pour cela que les chercheurs s'interrogent dès le départ sur l'intérêt éventuel d'une duplication de l'instrument qu'ils souhaitent développer.

À ce propos, il paraît nécessaire de mener une réflexion sur le niveau d'implication et la durée de soutien de la DT dans le montage de tels projets, sur l'équilibre entre les compétences disponibles ou à développer à la DT d'une part et dans les unités d'autre part, sur le niveau de technicité demandé à la DT

(R&D, conception, fabrication, mise en œuvre) et sur le recours éventuel à la sous-traitance. Par ailleurs, la mission première de la DT étant le soutien technique aux unités, c'est-à-dire aux projets financés en interne *via* une procédure d'Appel d'offres du CNRS-INSU, son implication dans le montage et l'exécution de projets à composante instrumentale mais à financement externe (ANR, EX...) ne doit être envisagée qu'en second lieu.

Enfin, l'activité de développement technologique doit être mieux reconnue lors de l'évaluation des chercheurs, et même des unités, et le recrutement de chercheurs spécialisés dans les développements expérimentaux doit être favorisé. Dans le même esprit, les recrutements d'ingénieurs et de techniciens dans les métiers liés au développement instrumental doivent être préservés.

## ■ Division technique du CNRS-INSU

La Division technique (DT) du CNRS-INSU regroupe 65 personnes du niveau ingénieur, technicien ou administratif et 60 marins. Dans le domaine Océan Atmosphère, elle assure de nombreuses missions au niveau national, parmi lesquelles :

- la mise en œuvre d'une flotte de deux navires de façade (Côte de la Manche et Thétis II) et de six navires côtiers ;
- la mise à disposition des laboratoires effectuant des mesures à la mer d'un parc d'instrumentation océanographique hauturière et côtière (matériel d'hydrologie, de mouillage et de prélèvement) ;
- la gestion et mise en œuvre des gliders océaniques des laboratoires français ;
- la participation à SAFIRE pour la gestion et la mise en œuvre de trois avions de recherche (ATR 42, Falcon 20 et Piper Aztec) ;
- le développement et la maintenance de nombreux instruments nationaux (RALI, AVIRAD, carottier glace 1000 m, SDLA, OPTIMISM, MOZART, PROLIPHYC, marégraphes, CARIOCA, station benthique...).

En outre, la DT contribue à la réalisation de projets techniques pour les laboratoires.

Les personnels de la DT sont répartis sur trois sites :

- **Brest** (14 IT) : parc océanographique et instrumentation à forte composante océanographique (dont lignes de mouillage et marégraphes) ; interactions fortes avec l'IPEV et l'UMS FOF, implication dans Coriolis (R&D sur données *in situ*), soutien à de grandes infrastructures des Sciences de la Terre (EPOS, CALIFF) et de Océan Atmosphère (CALIFF, C2FN).
- **La Seyne-sur-Mer** (22 IT) : centre national de mise en œuvre de gliders, équipement fond de mer (lien avec le CNRS-IN2P3 dans le cadre d'ANTARES), instrumentation bateaux, support au C2FN ; la Seyne a triplé ses effectifs en recrutant 15 IT en ~ 3 ans, ce qui résulte de la volonté stratégique du CNRS-INSU de soutenir l'activité de recherche en Méditerranée, en particulier dans le cadre de MISTRALS.
- **Meudon** (29 IT) : soutien aux laboratoires pour le développement d'instruments aéroportés (lidars...), embarqués sous ballons (spectromètre par diode laser...) et océanographiques (capteurs de pCO<sub>2</sub>...).

# Ressources humaines

Un recensement de tous les personnels travaillant dans le domaine Océan Atmosphère, quel que soit leur organisme d'appartenance et qu'ils soient permanents ou non (à l'exception des étudiants en thèse), ainsi que des départs en retraite attendus entre 2011 et 2015, a été réalisé en 2010. Ces informations proviennent des données extraites de L@bintel, lesquelles ont été complétées à l'aide d'enquêtes menées auprès de chacune des unités du domaine Océan Atmosphère du CNRS-INSU (CNRS-INSU/OA).

Ce travail a été réalisé avant les dernières modifications de périmètre du CNRS-INSU/OA. Les données recueillies ne correspondent donc pas à la répartition actuelle des unités entre le domaine Océan Atmosphère et le domaine Surfaces et Interfaces Continentales du CNRS-INSU. En outre, bien que de nombreux chercheurs (111) toute appartenance confondue ait été identifié comme travaillant sur des thématiques Océan Atmosphère dans des unités relevant d'autres domaines du CNRS-INSU ou d'autres instituts du CNRS, la majeure partie s'intéressant à l'océan et à ses interfaces, ils n'ont pas été inclus dans la synthèse présentée ici (à comparer aux 741 chercheurs toute appartenance confondue travaillant sur des thématiques Océan Atmosphère dans des unités du CNRS-INSU/OA).

Enfin, ni les Fédérations de recherche (faible nombre de personnels hors Île-de-France), ni les UMS rattachées à des OSU et par essence multidisciplinaires, ni la Division technique du CNRS-INSU n'ont été comptabilisés dans le périmètre de l'étude.

Pour l'étude des équilibres généraux entre organismes et entre catégories de personnels [chercheurs (Ch) et enseignants-chercheurs (EC) versus ingénieurs et techniciens (IT) et ingénieurs, administratifs, techniciens et ouvriers de service (IATOS)], tous les personnels des unités rattachées au CNRS-INSU/OA ayant moins de 65 ans en 2010 (y compris ceux ne travaillant pas sur des thématiques Océan Atmosphère) ont été pris en compte, soit 803 Ch - EC et 648 IT - IATOS (figures 1-3).

Dans l'exploitation fine de l'enquête, n'ont été pris en compte que les Ch - EC des unités du CNRS-INSU/OA travaillant sur des thématiques Océan Atmosphère (figures 4-6) et les IT - IATOS considérés comme tels par leurs organismes (figures 7-8).

## ■ Effectifs globaux (personnels permanents)

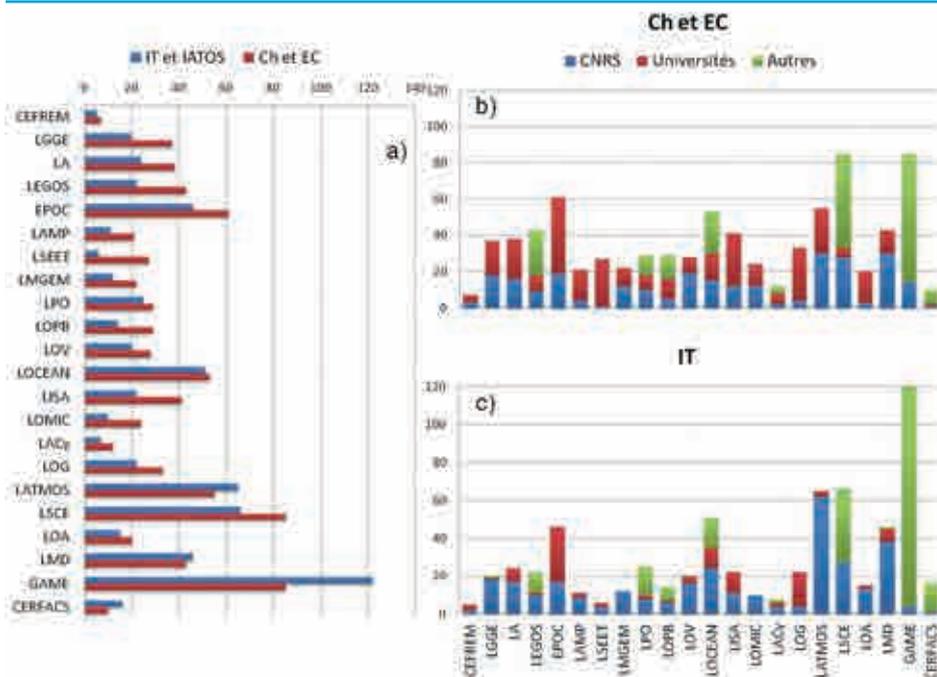


Figure 1 : Répartition des personnels permanents (803 Ch - EC et 648 IT - IATOS) dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA suivant leur catégorie et/ou leur appartenance.

## • Répartition par appartenance

En nombre de personnels permanents affectés dans les unités du CNRS-INSU/OA, les principaux organismes partenaires sont l'Éducation nationale et l'Université, Météo-France, le CEA, l'IRD, l'Ifremer, le CNES et le CERFACS.

Le CNRS et l'Université ont un nombre comparable de Ch et d'EC dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA, soit chacun environ 20 % du nombre total de personnels (figure 2). En revanche, le nombre d'IT CNRS (22 % du total) est triple de celui des IATOS de l'Université (7 % du total), un écart qui s'est accru depuis 2005. Les nombres de Ch et d'IT relevant des autres organismes sont équilibrés (14 et 15 % du total respectivement). Météo-France fournit plus de 50 % des IT non CNRS et le ratio IT/Ch est très variable suivant les organismes variant de ~ 2 (CERFACS, Ifremer) à 0.54 (IRD).

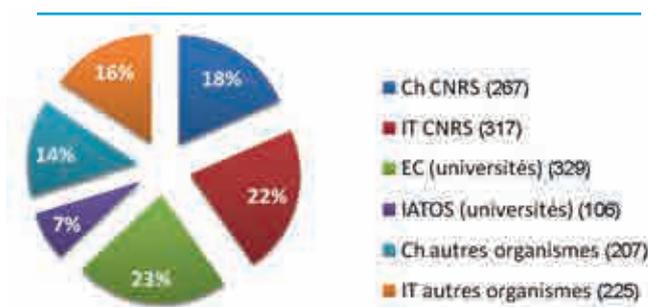


Figure 2 : Répartition par appartenance (CNRS, universités et autres organismes) des personnels permanents des unités rattachées au CNRS-INSU/OA. Le terme universités englobe les personnels rémunérés par les universités, le MENRT et le CNAP.

Organismes	Chercheurs		IT	
	nombre	%	nombre	%
Météo-France	75	36.2	120	53.3
CEA	51	24.6	39	17.3
CNES	5	2.4	4	1.8
IFREMER	7	3.4	14	6.2
IRD	59	28.5	32	14.2
CERFACS	8	3.9	15	6.7
Autres	2	1.0	1	0.4
Total	207	100	225	100

Répartition des personnels permanents des organismes autres que le CNRS et l'Université, affectés dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA.

## • Répartition par région

Le nombre de personnels de recherche varie très fortement d'une région à l'autre. 35 % des Ch - EC et 39 % des IT - IATOS sont en Île-de-France, 22 et 28 % respectivement en Midi-Pyrénées, puis ces chiffres décroissent rapidement jusqu'à des valeurs inférieures à quelques pourcents. La forte proportion de personnels en Midi-Pyrénées s'explique essentiellement par la présence de nombreux laboratoires (LEGOS, LA, GAME, CERFACS). À l'exception du GAME à Toulouse et d'EPOC en Aquitaine, les plus grosses UMR se trouvent en Île-de-France (LSCE, LATMOS, LOCEAN) et l'effort du CNRS y est particulièrement marqué en ce qui concerne les IT (plus de 51 % des IT CNRS du domaine Océan Atmosphère sont en Île-de-France dont 20 % au LATMOS).

## • Répartition par catégorie

Le rapport du nombre d'IT - IATOS au nombre de Ch - EC pour les personnels permanents varie de 0.22 à 1.6 suivant les unités. Il est généralement beaucoup plus favorable dans les URA (GAME et CERFACS) et dans les grosses UMR d'Île-de-France. Le manque persistant d'IT - IATOS dans les unités reste en grande partie lié au manque de recrutements universitaires, malgré une augmentation significative du nombre d'IATOS de niveau ingénieur par rapport à 2005.

Lorsqu'on prend en compte les CDD, le rapport du nombre d'IT - IATOS au nombre de Ch - EC augmente dans les UMR les moins bien dotées en IT - IATOS, car le pourcentage de CDD techniques dépasse 40 % des personnels techniques alors que celui des CDD « chercheur » reste faible.

## • Répartition par tranche d'âge

La répartition par tranche d'âge des Ch - EC en 2010 (figure 3-a) montre un net rajeunissement par rapport à celle de 2005 qui présentait 2 pics, le premier centré à 35-39 ans, l'autre moins marqué à 55-59 ans, et c'est à l'Université (et dans les grandes écoles) que ce rajeunissement est le plus net et que se trouve maintenant la majorité des personnels âgés de moins de 50 ans. La répartition par tranche d'âge des IT - IATOS montre en 2010 (figure 3-b) qu'une part importante (~ 25 %) de ces personnels ont 55 ans ou plus alors qu'elle était assez similaire en 2005 à celle des Ch - EC avec toutefois un maximum beaucoup plus marqué à 55-59 ans. Par rapport à 2005, la population IT a vieilli car l'âge moyen du personnel recruté augmente en raison d'un accroissement de la qualification et de l'expérience demandées.

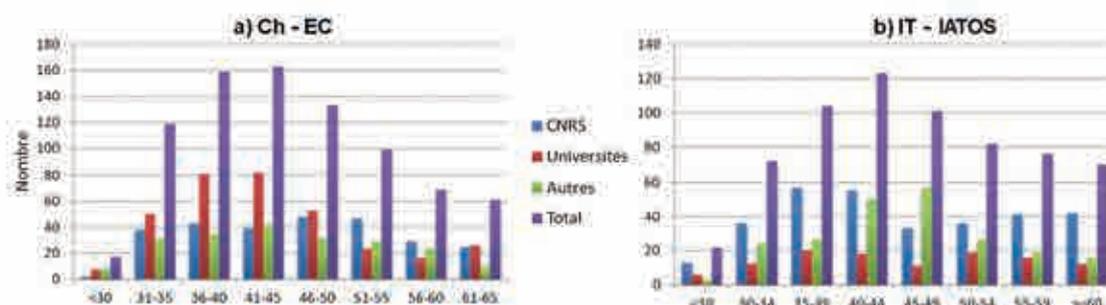


Figure 3 : Répartition par tranche d'âge et par organisme des Ch - EC et IT - IATOS permanents des unités rattachées au CNRS-INSU/OA.

## ■ Chercheurs et enseignants-chercheurs

À la question concernant leur domaine de recherche, sur les 741 Ch - EC travaillant sur des thématiques Océan Atmosphère et affectés dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA, 70 % n'ont mentionné qu'un seul domaine (océan, atmosphère, cryosphère ou interfaces), le terme interfaces signifiant une interface entre ces domaines ou entre l'un de ces domaines et le continent (figure 4). Les autres ont mentionné au moins deux domaines, dont le plus souvent les interfaces.

La pyramide des âges diffère d'un domaine de recherche à l'autre, avec une population légèrement plus jeune en sciences de l'atmosphère et plus âgée dans le domaine des interfaces.

Quel que soit leur organisme d'appartenance, les Ch - EC de la communauté Océan Atmosphère affectés dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA ont une approche à très forte composante expérimentale (figure 5). Les données qu'ils

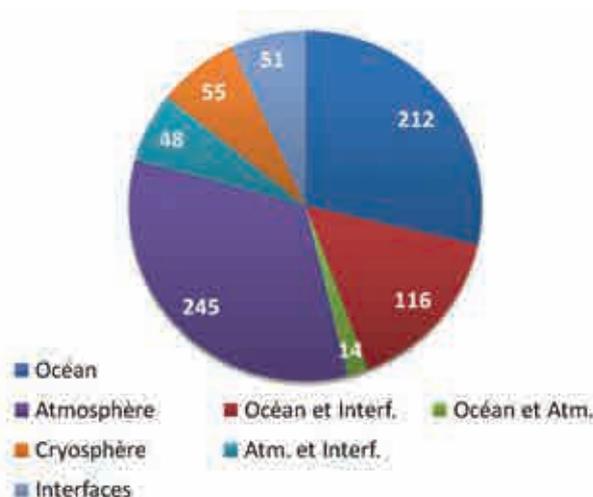


Figure 4 : Nombre de fois où un domaine scientifique (océan, atmosphère, cryosphère, interfaces, océan et atmosphère, océan et interfaces, atmosphère et interfaces) a été mentionné par les Ch - EC de la communauté Océan Atmosphère affectés dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA.

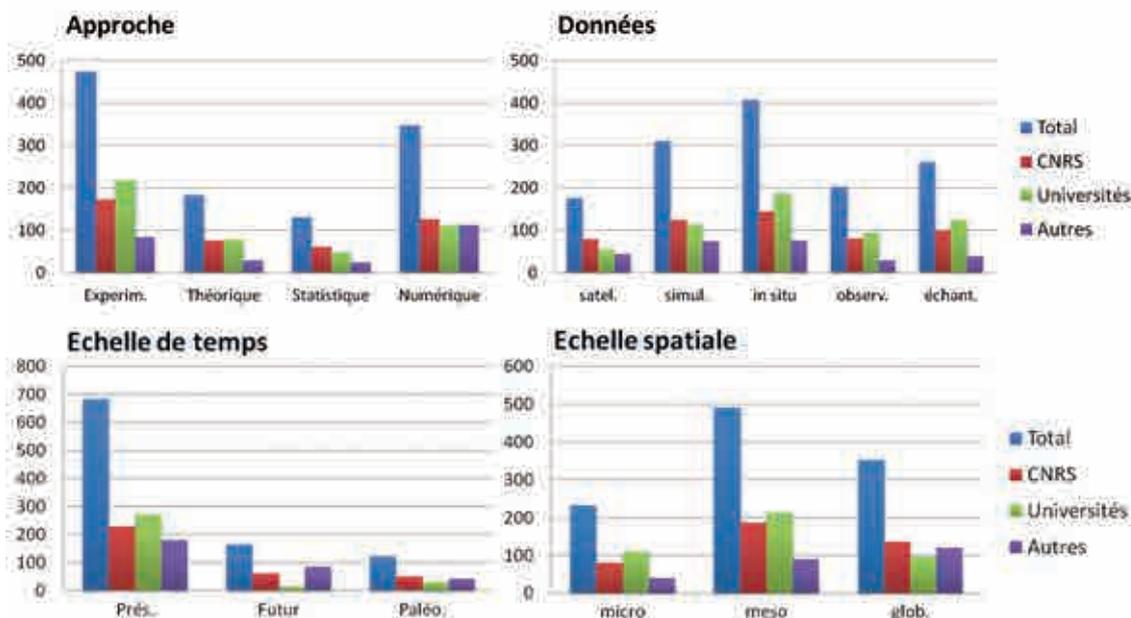
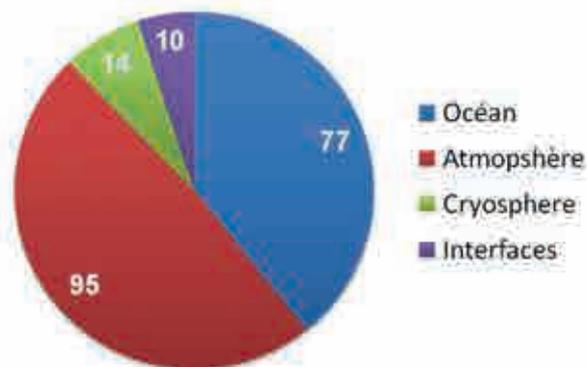


Figure 5 : Approches, mode d'acquisition des données (observations : données issues de Services d'observation), échelles temporelles et spatiales étudiées par les Ch - EC de la communauté Océan Atmosphère des différents organismes affectés dans des unités rattachées au CNRS-INSU/OA.

## Domaines d'étude simplifiés



## Approches

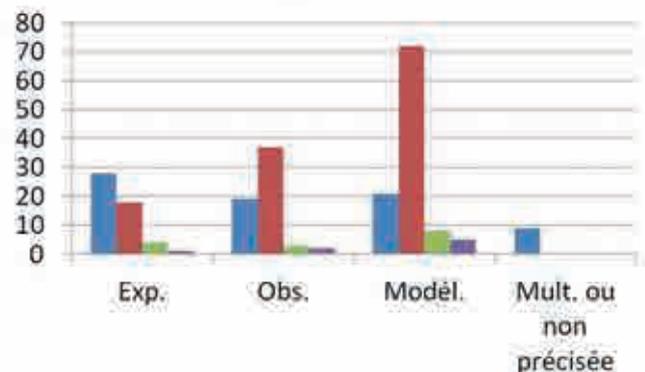


Figure 6 : Domaines d'études (océan, atmosphère, cryosphère, interfaces) et méthodes d'approche (expérimentation, observation, modélisation, choix multiple ou non précisé) des CDD chercheurs du domaine Océan Atmosphère en poste en 2010 dans les unités rattachées au CNRS-INSU/OA.

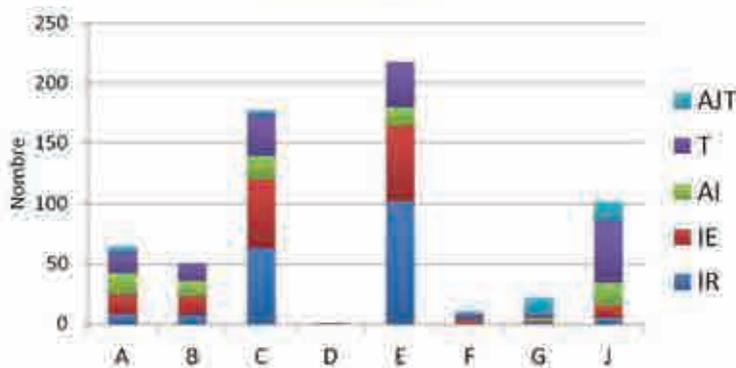
utilisent sont surtout acquises par mesures *in situ* ou issues de simulations numériques. Leurs études portent principalement sur le présent. Enfin, ils s'intéressent à toutes les échelles spatiales avec une préférence pour la méso-échelle.

Le nombre de chercheurs en CDD s'élève à 196 et leurs domaines d'étude diffèrent un peu de ceux des chercheurs permanents (figure 6) : la part des interfaces diminue légèrement (elle passe de 7 % à 5 %) ainsi que celle de l'océan (elle passe de 46 % à 38 %), au profit de celle de l'atmosphère (elle passe de 39 à 48 %). Par ailleurs, davantage de CDD sont affectés à des tâches d'observation et surtout de modélisation, particulièrement en sciences de l'atmosphère.

## Personnels IT - IATOS

Les 648 emplois d'IT - IATOS permanents des unités rattachées au CNRS-INSU/OA ont été renseignés par les unités par BAP (branches d'activité professionnelle) et grade. Comme en 2005, on observe une forte proportion d'ingénieurs (AI, IE et IR) en BAP C (instrumentation) et E (informatique, statistique et calcul scientifique), avec une très forte implication du CNRS mais aussi d'organismes comme Météo-France. L'Université recrute peu d'IATOS et essentiellement dans les petits grades (~ 57 % de T et AJT). Les techniciens sont recrutés essentiellement en BAP J (gestion et pilotage) mais aussi C et E, l'ensemble des organismes s'impliquant en BAP J.

## Grades et BAP



## Grades et Organismes

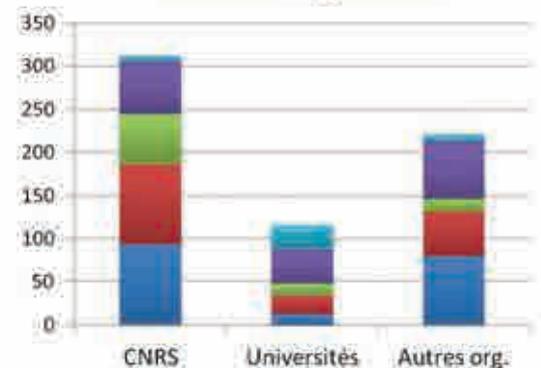
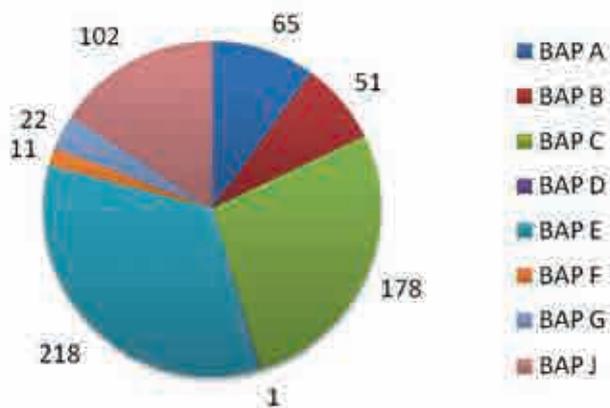
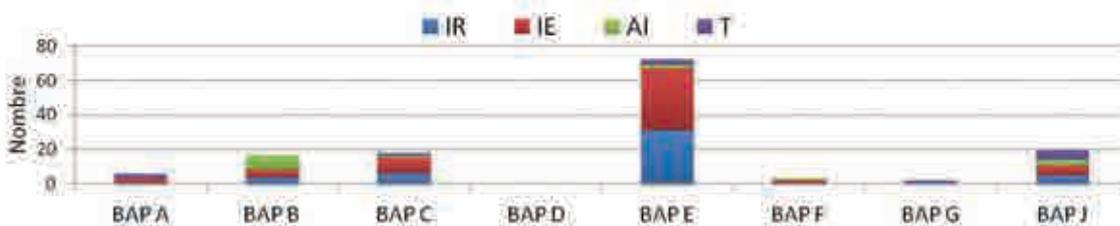
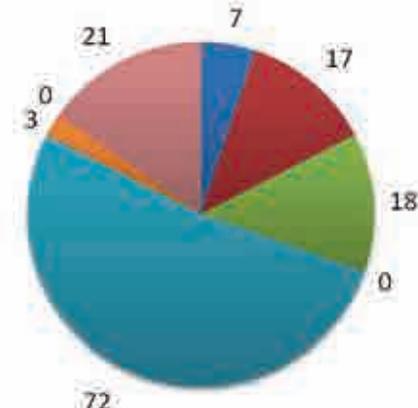


Figure 7 : Domaines d'activité et grade des IT - IATOS permanents des unités rattachées au CNRS-INSU/OA. Répartition par grade dans chaque BAP et organisme. BAP A : sciences du vivant ; BAP B : sciences chimiques et sciences des matériaux ; BAP C : Sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique ; BAP D : sciences humaines et sociales ; BAP E : informatique, statistique et calcul scientifique ; BAP F : documentation, culture, communication, édition, TICE ; BAP G : patrimoine, logistique, prévention et restauration ; BAP J : gestion et pilotage.

a) IT tous organismes - 648 agents



b) CDD en cours en 2010 : 138 personnes



c) Grades des CDD en cours en 2010

Figure 8 : Domaines d'activité et grades des CDD techniques en poste en 2010 ; a) référence (personnels permanents) ; b) répartition par BAP des CDD ; c) répartition des grades des CDD dans chaque BAP.

Le recrutement d'IT - IATOS en CDD a légèrement évolué entre 2005 et 2010, une population très qualifiée commençant à apparaître en BAP J (dont le besoin au niveau du recrutement permanent est traditionnellement sous-évalué) en lien avec les projets (Europe, ANR...) et les GIS. Il se fait essentiellement au grade d'ingénieur et préférentiellement dans certaines BAP, notamment E (environ 65-70 %) et C. Globalement, il y a très peu de recrutements en CDD de techniciens. Les CDD en poste en 2010 sont au nombre de 138.

La comparaison des sous-domaines d'activité des personnels en BAP E (permanents et CDD) montre qu'en 2010, il y a plus de CDD dans les sous-domaines développement d'applications, calcul numérique (incluant ici algorithmique et modélisation), informatique statistique (traitement et assimilation de données) et élaboration / gestion de systèmes d'information et de bases de données, que dans les fonctions supports (systèmes et réseaux), probablement parce qu'il est possible d'obtenir de tels CDD *via* les financements de projets. En BAP C, ce ne sont pas les métiers de base spécialisés (mécanique, électronique...) qui sont recherchés mais des formations plus généralistes en instrumentation. Enfin, en BAP J, on voit apparaître de nouvelles activités liées à la traçabilité et/ou qualité et à la coordination de projets.

La majorité des ingénieurs de recherche permanents sont recrutés en BAP E (~ 53 %) mais de façon moins marquée que pour les CDD. Il semble que ce soit une spécificité du domaine Océan Atmosphère, liée notamment aux importantes activités de modélisation, d'assimilation et de gestion de données. Le recrutement de personnels très qualifiés en instrumentation (BAP C) semble décroître, tant en CDD qu'en personnel permanent (figure 8). Cette tendance ne reflète pas une diminution des besoins mais peut s'expliquer par la difficulté à trouver des personnels tout de suite très efficaces dans des domaines pointus et par le rôle croissant de la sous-traitance et/ou de la DT.

La population des personnels susceptibles de partir à la retraite dans les 5 ans à venir (personnels âgés de 60 ans ou plus en 2010) a été recensée : 9 départs en BAP A, soit 14 % des effectifs, majoritairement en caractérisation des milieux naturels qui est une partie importante de l'activité de cette BAP ; 5 départs en BAP B, soit 10 % des effectifs, essentiellement en analyse chimique qui est une activité très majoritaire des personnels de cette BAP ; 24 départs en BAP C, soit 14 % des effectifs, affectant surtout les métiers de base (mécanique et électronique) ; 14 départs en BAP E, soit 7 % des effectifs, majoritairement en calcul numérique ; 15 départs en BAP J,

soit 15 % des effectifs, affectant surtout le corps des IE (30 %) et dans une moindre mesure celui des AJT et celui des T qui regroupe la majeure partie des effectifs.

## ■ Recommandations

Le travail de recueil des données a permis de constater que :

- il n'existe toujours pas de base centralisée, complète et maintenue à jour des personnels permanents, incluant notamment les métiers des IT - IATOS et, idéalement, les domaines de recherche des Ch - EC ;
- le suivi des personnels en contrat à durée déterminée (CDD) est très parcellaire.

Les informations ont donc été difficiles à obtenir et ont demandé aux unités un surcroît de travail pas toujours bien compris.

En conséquence, la communauté recommande au CNRS-INSU de mettre en place un suivi systématique du personnel permanent et en CDD, regroupant notamment les informations suivantes : la localisation de l'ensemble des Ch - EC permanents qui travaillent dans le domaine OA mais ne sont pas dans des unités rattachées au CNRS-INSU/OA ; les métiers des IT permanents, quel que soit leur organisme d'appartenance (ce n'est actuellement pas fait pour les personnels non CNRS) ; le nombre, la durée et le type de contrat des personnels en CDD, ainsi que la fonction qu'ils occupent réellement (niveau, travail effectué, post-doc versus IR, domaine de recherche précis ou code du métier exercé). Ce suivi pourrait s'appuyer sur L@bintel à condition de s'assurer que les unités renseignent les informations concernant les CDD quel que soit l'organisme dont ils dépendent et que les fonctionnalités de L@bintel soient étendues pour permettre le suivi des activités des agents.

L'écart croissant entre les nombres d'IT et d'IATOS dans les unités du CNRS-INSU/OA est un problème que le CNRS se doit de tenter de résoudre avec ses partenaires universitaires.

L'augmentation récente des recrutements de personnels en CDD, parallèlement à la difficulté de recruter des personnels permanents, a certes permis l'émergence de certains projets, mais présente plusieurs risques qui doivent être analysés.

Il y a notamment un réel risque de perte de compétences et/ou de connaissances, en raison du taux de renouvellement inhérent au mode de recrutement en CDD (imposé par les règles du droit des EPST ou des EPIC) et il est donc recommandé à chaque unité d'identifier clairement si leurs personnels en CDD pallient un manque ponctuel de forces ou remplissent une fonction pérenne et d'en tirer les conséquences adéquates en terme de priorité de recrutement de personnel permanent.

Il conviendrait en outre de réfléchir à la façon de faire apparaître l'apport des CDD à tous les niveaux de l'exploitation des résultats d'un projet. Les unités devraient également assurer à leurs CDD les moyens d'acquérir de l'expérience et de la valoriser.

Au cours de la réflexion menée sur les futurs enjeux de recherche dans le domaine Océan Atmosphère, il est clairement apparu que la mise en œuvre de la prospective nécessitera des ingénieurs hautement qualifiés sur l'ensemble des nouvelles techniques d'observation, d'expérimentation et de modélisation et il est donc recommandé, aussi bien aux laboratoires qu'aux organismes, de favoriser plus qu'ils ne le font actuellement ce type de recrutement.

Par ailleurs, le fait que les IT - IATOS, tant en CDD qu'en personnels permanents, soient majoritairement recrutés en BAP E fait craindre une baisse des recrutements en BAP C, ce qui serait fortement préjudiciable à l'avenir de l'expérimentation et de l'acquisition de données hors télé-détection. Il est donc recommandé aux laboratoires et aux organismes de veiller à ne pas négliger le recrutement en BAP C. De même, il s'agira de recruter en priorité des chercheurs expérimentalistes, afin d'assurer un équilibre dans la communauté entre observation et modélisation.





# Acronymes

<b>3MI</b>	Multiangle, multispectral, multipolarisation instrument
<b>AI</b>	Assistant ingénieur
<b>AJT</b>	Adjoint technique
<b>ALADIN</b>	Aire limitée, adaptation dynamique, développement international
<b>AMS</b>	Aerosol mass spectrometer
<b>AMSU</b>	Advanced microwave sounding unit
<b>ANR</b>	Agence nationale de la recherche
<b>ANTARES</b>	Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research
<b>ARN/ADN</b>	Acide ribonucléique / acide désoxyribonucléique
<b>AROME</b>	Applications de la recherche à l'opérationnel à méso-échelle
<b>ARPEGE</b>	Action de recherche petite échelle grande échelle
<b>ASSIM</b>	Assimilation de données
<b>A-TRAIN</b>	Afternoon constellation
<b>AUV</b>	Autonomous underwater vehicle
<b>BAP</b>	Branches d'activité professionnelle
<b>BAP A</b>	Sciences du vivant
<b>BAP B</b>	Sciences chimiques et sciences des matériaux
<b>BAP C</b>	Sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique
<b>BAPD</b>	Sciences humaines et sociales
<b>BAP E</b>	Informatique, statistique et calcul scientifique
<b>BAP F</b>	Documentation, culture, communication, édition, TICE
<b>BAP G</b>	Patrimoine, logistique, prévention et restauration
<b>BAP J</b>	Gestion et pilotage
<b>BRGM</b>	Bureau de recherches géologiques et minières
<b>C2FN</b>	Centre de carottage et de forage national
<b>CALIFF</b>	Carothèque, lithothèque et forage français
<b>CALIOP</b>	Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization
<b>CALIPSO</b>	Cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations
<b>CARIOCA</b>	Carbon interface ocean atmosphere buoy
<b>CAROLS</b>	Cooperative airborne radiometer for ocean and land studies
<b>CCRT</b>	Centre de calcul recherche et technologie
<b>CEA</b>	Commissariat à l'énergie atomique
<b>CEAS</b>	Cavity enhanced absorption spectroscopy
<b>CEFREM</b>	Centre de formation et de recherche sur l'environnement marin
<b>CEPMET</b>	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
<b>CERFACS</b>	Sciences de l'Univers au CERFACS
<b>CESAM</b>	Chambre expérimentale de simulation atmosphérique multiphasique
<b>CHAT</b>	Chimie atmosphérique
<b>CHIMERE</b>	Modèle atmosphérique de chimie-transport et dépôt
<b>CINES</b>	Centre informatique national de l'enseignement supérieur
<b>CIO</b>	Comité interorganisme

<b>CLIC</b>	Climate and cryosphere
<b>CLIVAR</b>	Climate variability
<b>CNAP</b>	Conseil national des astronomes et physiciens
<b>CNES</b>	Centre national d'études spatiales
<b>CNRM</b>	Centre national de recherches météorologiques
<b>CNRS-IN2P3</b>	Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
<b>CRDS</b>	Cavity ring-down spectroscopy
<b>CYBER</b>	Cycles biogéochimiques, environnement et ressources
<b>DT</b>	Direction technique
<b>ENSO</b>	El Nino southern oscillation
<b>EPIC</b>	Établissement public à caractère industriel et commercial
<b>EPOC</b>	Environnements et paléo-environnements océaniques
<b>EPOS</b>	European plate observing system
<b>EPS-SG</b>	EUMETSAT polar system - Second generation
<b>EPST</b>	Établissement public à caractère scientifique et technique
<b>ESA</b>	European spatial agency
<b>ESF</b>	European science foundation
<b>EUFAR</b>	European facility for airborne research
<b>EUMETSAT</b>	European organization for the exploitation of meteorological satellites
<b>EUSAAR</b>	European supersites for atmospheric aerosol research
<b>EVE</b>	Évolution et variabilité du climat à l'échelle globale
<b>FOF</b>	Flotte océanographique française
<b>GAME</b>	Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique
<b>GEISA</b>	Gestion et étude des informations spectroscopiques atmosphériques
<b>GENCI</b>	Grand équipement national de calcul intensif
<b>GECKO-A</b>	Generator for explicit chemistry and kinetics of organics in the atmosphere
<b>GEOTRACES</b>	Geochemical traces
<b>GEWEX</b>	Global energy and water cycle experiment
<b>GIEC</b>	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
<b>GLACIOCLIM</b>	Les glaciers, un observatoire du climat
<b>GMES</b>	Global monitoring for environment and security
<b>GMMC</b>	Groupe mission Mercator Coriolis
<b>GOSAT</b>	Greenhouse gases observing satellite
<b>GPS</b>	Global positioning system
<b>HITRAN</b>	High-resolution light transmission molecular absorption database
<b>IASI</b>	Infrared atmospheric sounding interferometer
<b>IATOS</b>	Ingénieurs, administratifs, techniciens et ouvriers de service
<b>IDA0</b>	Interactions et dynamique de l'atmosphère et de l'océan
<b>IDRIS</b>	Institut du développement et des ressources en informatique scientifique
<b>IE</b>	Ingénieur d'études
<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>IMAGES</b>	International marine past global change study
<b>IMAGO</b>	Interactions multiples glace, atmosphère, océan
<b>IMBER</b>	Integrated marine biogeochemistry and ecosystem research
<b>IMMEC</b>	Infrastructure for measurements of the European carbon cycle
<b>INRA</b>	Institut national de la recherche agronomique
<b>IPEV</b>	Institut polaire français Paul-Émile Victor
<b>IPICS</b>	International partnership for ice core science
<b>IPSL</b>	Institut Pierre Simon Laplace
<b>IR</b>	Ingénieur de recherche
<b>IRD</b>	Institut de recherche pour le développement
<b>IT</b>	Ingénieur et technicien
<b>LA</b>	Laboratoire d'aérodynamique
<b>LACY</b>	Laboratoire de l'atmosphère et des cyclones
<b>LAMP</b>	Laboratoire de météorologie physique
<b>LEFE</b>	Les enveloppes fluides et l'environnement
<b>LEGOS</b>	Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales
<b>LGGE</b>	Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement
<b>LIMOS</b>	Laboratoire des interactions microorganismes minéraux - matière organique dans les sols
<b>LISA</b>	Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques
<b>LMDz</b>	Laboratoire de météorologie dynamique zoom
<b>LMGEM</b>	Laboratoire de microbiologie, de géochimie et d'écologie marines
<b>LOA</b>	Laboratoire d'optique atmosphérique
<b>LOCEAN</b>	Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques
<b>LOG</b>	Laboratoire d'océanologie et de géosciences
<b>LOICZ</b>	Land ocean interactions in the coastal zone
<b>LOMIC</b>	Laboratoire d'océanographie microbienne
<b>LOPB</b>	Laboratoire d'océanographie physique et biogéochimique
<b>LOV</b>	Laboratoire d'océanographie de Villefranche
<b>LPO</b>	Laboratoire de physique des océans
<b>LSCE</b>	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
<b>LSEET</b>	Laboratoire de sondages électromagnétiques de l'environnement terrestre
<b>MAR</b>	Modèle atmosphérique régional
<b>MEDDTL</b>	Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement
<b>MESR</b>	Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
<b>METOP</b>	Meteorological operational satellite
<b>MISTRALS</b>	Mediterranean integrated studies at regional and local scales
<b>MOCAGE</b>	Modèle de chimie atmosphérique à grande échelle
<b>MOOSE</b>	Mediterranean ocean observing system on environment
<b>MOZAIC</b>	Measurements of ozone and water vapour by in-service airbus aircraft

<b>MOZART</b>	Mesure d'ozone à bord d'avions régionaux et de trains à grande vitesse
<b>NEMO</b>	Nucleus for European modelling of the ocean
<b>NEMOVAR</b>	NEMO variationnel
<b>OPA</b>	Océan parallèle
<b>OPTIMISM</b>	Observation dynamical and thermodynamical processes involved in the sea ice mass balance for <i>in situ</i> measurements
<b>ORME</b>	Observatoire régional méditerranéen sur l'environnement
<b>OSU</b>	Observatoire des sciences de l'Univers
<b>PARASOL</b>	Polarisation et anisotropie des réflectances au sommet de l'atmosphère
<b>PMF</b>	Positive matrix factorisation
<b>PNTS</b>	Programme national de télédétection spatiale
<b>PRACE</b>	Partnership for advanced computing in Europe
<b>PROLIPHYC</b>	Prolifération phytoplanctonique – application aux cyanobactéries
<b>RALI</b>	Radar - Lidar
<b>RENATER</b>	Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche
<b>SAFIRE</b>	Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement
<b>SAPHIR</b>	Sondeur atmosphérique du profil d'humidité intertropicale par radiométrie
<b>SDLA</b>	Spectromètre à diodes laser accordables
<b>SMOS</b>	Soil moisture and ocean salinity satellite
<b>SMOSMANIA</b>	Soil moisture observing system - meteorological automatic network integrated application
<b>SNOCO</b>	Service national d'océanographie côtière opérationnelle
<b>SO</b>	Service d'observation
<b>SOERE</b>	Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
<b>SOLAS</b>	Surface ocean - lower atmosphere study
<b>SPIRALE</b>	Spectroscopie infrarouge par absorption de laser embarqué
<b>SSM/I/S</b>	Special sensor microwave imager / Sounder
<b>SURFEX</b>	Surface externalisée
<b>SWATMEX</b>	Soil water and temperature in Mediterranean experiment
<b>SWOT</b>	Surface water ocean topography
<b>T</b>	Technicien
<b>TAAF</b>	Terres australes et antarctiques françaises
<b>TOPEX/Poseidon</b>	The ocean topography experiment / Poseidon
<b>TOSCA</b>	Terre, océan, surfaces continentales et atmosphère
<b>UMI</b>	Unité mixte internationale
<b>UMR</b>	Unité mixte de recherche
<b>UMS</b>	Unité mixte de service
<b>URA</b>	Unité de recherche associée
<b>VMP</b>	Vertical mixing profiler
<b>WCRP</b>	World climate research program
<b>XBT</b>	Expendable bathythermograph



### Coordination éditoriale

Dominique Armand (CNRS-INSU)

### Réalisation et impression

Imprimé par CARACTERE sur du papier issu de forêts gérées durablement.



### Conception

Trait de caractère(s)

Novembre 2012

## ■ Légendes de la mosaïque de couverture



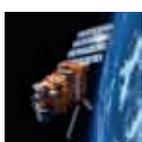
Préparation du manchon gonflable nécessaire au pompage, *via* le trou de forage, de l'air contenu en profondeur dans le névé polaire de Summit au centre du Groenland. © LGGE, Xavier Faïn



Lâché d'un ballon météorologique pour l'observation de la structure thermodynamique de l'atmosphère, réalisé durant la campagne AMMA de l'été 2006. © AMMA, Météo-France, Pascal Taburet



Installation d'une pompe à particules sur le câble du Marion Dufresne durant la campagne KEOPS de 2005. Cette pompe permet de filtrer de grands volumes d'eau à des profondeurs choisies. L'analyse des particules ainsi collectées permet d'estimer la quantité de carbone exportée vers les profondeurs. © KEOPS



Le satellite météorologique européen MetOp-A mis en orbite fin 2006 avec à son bord l'instrument IASI (Interféromètre atmosphérique de sondage infrarouge) développé par le CNES (indiqué par une flèche sur l'illustration). © ESA-Silicon World

# Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



**INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS**  
Centre National de la Recherche Scientifique  
3, rue Michel-Ange  
75794 Paris Cedex 16

<http://www.insu.cnrs.fr>