

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



Océan Atmosphère
2017-2022

Bilan et Prospective 2017-2022 de la Commission spécialisée Océan Atmosphère de l'Institut national des sciences de l'Univers

Synthèse des ateliers préparatoires et du colloque de Toulouse

15 - 17 novembre 2016

Sous la direction de Stéphane Blain, Président de la CSOA.

Ont participé à la rédaction de ce document

• membres de la CSOA

Stéphane Blain, Florence Birol, Jérôme Chappellaz, Cyril Crevoisier, Barbara D'Anna, Alain Dabas, Yves Gouriou, Cécile Guieu, Eric Guilyardi, Marie-Noëlle Houssais, Philippe Keckhut, Paolo Laj, Maud Leriche, Frédéric Parol, Nicolas Savoye, Christian Tamburini, Claire Waelbroeck

• membres des groupes de travail et animateurs d'ateliers

Lotfi Aouf, Laurent Arnaud, Mark Asch, Olivier Aumont, Pierre Bahurel, Bernard Barnier, Matthias Beekmann, Fabien Blarel, Eric Blayo, Marc Bocquet, Laurent Bopp, Jean-Michel Brankart, Pascale Bouruet-Aubertot, Philippe Bousquet, Viviane Bout-Roumazeilles, Thierry Bouvier, Marie Boyé, Michel Calzas, Jean-Pierre Cammas, Xavier Capet, Damien Cardinal, Valéry Catoire, Emmanuel Cosme, Fabio d'Andrea, Fabrizio d'Ortenzio, Christophe Delacourt, Sébastien Denvil, Gérald Desroziers, Frédéric Diaz, Hervé Douville, Jean-Louis Dufresne, Gaël Durand, Franck Dumas, Xavier Durieu de Madron, Mary Elliot, Patrick Farcy, Vincent Favier, Cyrille Flamant, Paola Formenti, Fabienne Gaillard, Véronique Garçon, Gilles Garric, Dominique Genty, Emmanuelle Geslin, Fabien Gibert, Carl Gojak, Lionel Gourdeau, Antoine Grémare, Lionel Guidi, Christian Guillaume, Sylvestre Huet, Catherine Jeandel, Lillian Joly, Julien Jouanno, Christine King, Cyril Lathuilière, Kathy Law, Hervé Le Treut, Karine Leblanc, Etienne Leblois, Franck Lefèvre, Benjamin Loubet, Eric Machu, Céline Mari, Gabriel Marquette, Patrick Marsaleix, Olivier Marti, Béatrice Marticorena, Roland Martin, Guillaume Maze, Herlé Mercier, Patrick Monfray, Yves Morel, Fernando Niño, Ingrid Obernosterer, Nicole Papineau, Aurélien Paulmier, Nathalie Philippon, Marc Picheral, Laurence Picon, Christel Pinazzo, Sophie Rabouille, Gilles Reverdin, Didier Ricard, Philippe Ricaud, Sophie Ricci, Gwendal Rivière, Daniele Romanini, Maud Rotger, Guillaume Roulet, Denis-Didier Rousseau, Géraldine Sarthou, Carolyn Scheurle, Coralie Schoemaeker, Karine Sartelet, Sabine Schmidt, Karine Sellegri, Dominique Serça, Marc Sourisseau, Didier Swingedouw, Laurent Terray, Pierre Testor, Solène Turquety, Laurence Vidal, Éric Villenave, Françoise Vimeux, Frédéric Vivier, Didier Voisin, Bruno Zakardjian.

• représentants des organismes partenaires

Isabelle Bénézeth (MEEM), Marie Berthelot (EDF), Elsa Cortijo (CEA), Jean-Marie Flaud et Élisabeth Verges (MENESR), Cyrille Lathuilière (SHOM), Pascal Morin (IPEV), Marc Pontaud et Jacques Parent du Châtelet (Météo-France), Nathalie Poisson (ADEME), Frédérique Seyler (IRD), Claire Treignier (Ifremer), Pascale Ultré-Guérard et Carole Deniel (CNES).

• membres de la direction

Gérard Ancellet, Bruno Blanke, Philippe Bertrand, Pascale Delecluse, Jean-François Doussin, Pascale Ebner, Gérard Eldin, Jean-Jacques Fourmond, Nathalie Huret, Pierre Kern.

Sommaire

Éditorial	p. 6
Les grandes lignes.....	p. 8
Bilan 2011 - 2016.....	p. 11
Préambule	p. 12
Synergies entre études de processus et modélisation des enveloppes fluides	p. 13
Étudier l'impact du changement global sur les milieux	p. 16
Synergies entre recherche fondamentale et applications opérationnelles	p. 21
Encourager les recherches sur les processus spécifiques aux interfaces	p. 24
Étendre les recherches sur les méthodes numériques.....	p. 26
Chantier Mistral, Arctique et produits opérationnels en Afrique de l'Ouest	p. 27
Autres questions scientifiques abordées depuis 2011	p. 30
Instrumentation : développements, observations, production de données de référence.....	p. 32
Prospective scientifique	p. 35
Renforcer les connaissances sur les grands thèmes fondateurs du domaine Océan-Atmosphère	p. 36
Les nouvelles frontières avec le vivant	p. 46
Les enveloppes océan/atmosphère/cryosphère dans une vision intégrée du système Terre : cycles et interfaces	p. 48
Études intégrées régionales.....	p. 54
Observation et modélisation : consolider et innover	p. 58
Structuration et financement de la recherche aux niveaux national et international.....	p. 63
Développement instrumental	p. 67
Division Technique du CNRS-INSU.....	p. 71
Calcul scientifique et grande masse de données	p. 73
Copernicus : La Terre vue par l'Europe	p. 76
Infrastructures	p. 79
Interaction recherche-société et formation	p. 91
Ressources humaines	p. 97
Annexes	p. 109
Listes des services nationaux OA	p. 110
Composition de la FOF	p. 113
Acronymes.....	p. 114

Éditorial

Depuis le début de l'année 2016, la communauté nationale océan – glace – atmosphère – climat se mobilise pour définir les orientations qu'elle souhaite donner à ses thèmes de recherche pour la prochaine décennie. Chercheurs, ingénieurs et techniciens du CEA, du Cerfacs, du CNES, du CNRS, de l'Ifremer, de l'IRD, de Météo-France, du MNHN, de grandes écoles scientifiques et d'universités (pour ne citer que les organismes les plus visibles par leur implication dans les Unités mixtes de recherche du domaine OA du CNRS-INSU), ont répondu présent à l'appel de la Commission spécialisée Océan Atmosphère et de son président, Stéphane Blain, et je les en remercie.

Sur la lancée de l'exercice précédent, concrétisé par un document de prospective édité fin 2012, la réflexion s'est organisée autour d'ateliers pilotés par la CSOA et d'une consultation élargie portée par un forum participatif mettant en exergue certains thèmes choisis. Le colloque de synthèse qui s'est tenu à Toulouse du 15 au 17 novembre 2016 a rassemblé la communauté, a dressé un bilan de l'activité scientifique des quatre années écoulées, et a permis de discuter puis d'établir les lignes de force du nouveau document de prospective.

La dernière prospective avait mis l'accent sur l'amélioration de la prévision de l'évolution du système Terre, des échelles synoptiques aux échelles climatiques. Les recherches aux interfaces des différentes composantes du système y étaient encouragées. Elle recommandait également des études d'impact du changement climatique sur les différents milieux. Force est de constater que ces recommandations ont été suivies d'effet et que le bilan présenté ci-après fait état d'avancées significatives sur ces différents questionnements.

La densité et la qualité du travail réalisé ces derniers mois dotent aujourd'hui la communauté de nouveaux repères fiables pour mettre sur pied les projets scientifiques qui lui tiennent à cœur. L'analyse circonstanciée des forces et faiblesses auxquelles cette science est confrontée est un sérieux atout pour guider la prospection, puis la mise en place du soutien et des financements indispensables à son succès. La stratégie nationale des infrastructures de recherche, pilotée par le ministère de la Recherche et mise en œuvre par les différents organismes, offre ici un cadre cohérent pour l'inscription dans la durée de nombreux défis scientifiques qui concernent aussi bien l'observation, l'expérimentation et la modélisation.

La communauté Océan Atmosphère est en effet particulièrement concernée par la construction, sur le plan national et européen, de telles infrastructures. Qu'elles soient dédiées aux instruments et technologies, aux observations, à la modélisation ou encore au stockage et au partage de données, ces IR occupent désormais une place centrale dans le paysage de notre recherche. Les efforts consentis pour organiser et regrouper des services et des moyens sur des critères d'excellence scientifique et technique, avec un travail approfondi sur les budgets mobilisés, les gouvernances et l'ouverture vers le monde socio-économique, ne doivent pas faire oublier que ces IR restent au service des scientifiques eux-mêmes, et sont pensées pour soutenir le développement d'activités de recherche de très grande qualité. Il est donc essentiel que notre communauté s'approprie pleinement le positionnement et les mécanismes de fonctionnement de ces infrastructures.

Comme mes prédécesseurs à la direction adjointe scientifique Océan Atmosphère, et plus particulièrement Philippe Bertrand à qui j'ai succédé, je m'appuierai sur ce document de prospective pour promouvoir et organiser la stratégie scientifique du CNRS-INSU pour le domaine OA. Avec l'aide précieuse de mes proches collaborateurs (personnel administratif de l'institut, délégués scientifiques et chargés de mission, responsables des programmes LEFE et PNTS et de l'appel d'offres ballon, présidents des sections « Système Terre : enveloppes superficielles » du Comité national et « Surfaces Continentales Océan Atmosphère » du Conseil national des astronomes et physiciens, et bien sûr nouvelle CSOA qui va se mettre en place cette année), je veillerai à gérer les ressources disponibles pour notre communauté au mieux de nos intérêts communs. Je compte sur les relations de confiance établies avec les directeurs de nos fédérations de recherche, observatoires des sciences de l'univers et unités mixtes de recherche ou de service pour accompagner les avancées scientifiques de notre domaine, et trouver avec eux les solutions les plus pertinentes aux difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre des activités de recherche de leurs personnels.

À une époque où les organismes de recherche souffrent, du fait des contraintes qui pèsent sur leurs ressources et leurs budgets, je note avec plaisir que l'enthousiasme de la communauté lui ne s'essouffle pas. Pour les plus jeunes d'entre nous pour lesquels cette prospective était la première du genre, je veux croire qu'ils ont été séduits par l'exercice. J'espère qu'ils ne manqueront pas d'animer avec ferveur les travaux de cette communauté qui est la leur, et en temps voulu de reprendre le flambeau pour porter plus haut encore les ambitions du domaine OA.

Bruno Blanke

Directeur adjoint scientifique Océan-Atmosphère

Les grandes lignes

Les objets (océan, atmosphère, cryosphère) étudiés sont de très grande dimension et nécessitent que la communauté dite «Océan Atmosphère» (OA) soit bien organisée, au plan national comme international.

Il apparaît donc essentiel de mettre en place d'une part une programmation partagée par la communauté et d'autre part des programmes nationaux en soutien à cette programmation. La structuration de la communauté permet d'être force de proposition pour les affichages nationaux mais aussi dans les programmes européens et internationaux, et de prendre des leaderships sur ses points forts. L'interdisciplinarité est également une nécessité en OA. Par ailleurs l'utilisation de grands moyens d'observation et de modélisation est souvent incontournable. Dans ce contexte, la réflexion prospective menée tous les cinq ans est un temps fort, car reposant pour une large part sur l'expression de la communauté OA. Cette prospective est aussi nourrie par – et donc en excellente adéquation avec – les prospectives des grands programmes internationaux (Future Earth, WCRP) car de nombreux chercheurs sont présents dans ces instances.

Les recherches menées dans le domaine Océan Atmosphère (OA) appartiennent par nature aux sciences de l'environnement. Par conséquent, elles sont d'un grand intérêt pour la société. La prospective conduite dans le domaine OA propose de mener de front et de manière équilibrée des recherches pour :

Renforcer les connaissances sur les grands thèmes fondateurs du domaine Océan-Atmosphère. Cela passe par l'approfondissement de notre compréhension des processus mis en œuvre dans les enveloppes fluides que sont l'atmosphère et l'océan. La connaissance de ces processus implique leur description d'un point de vue qualitatif mais aussi quantitatif, ainsi que leur modélisation, afin de déterminer et de documenter les échelles spatiales et temporelles qui leur sont associées, ainsi que leurs variabilité et interactions. De nouvelles voies doivent être explorées pour décrire la complexité de notre environnement notamment au travers de l'étude des couplages et des interactions d'échelles. Cette approche intégrée processus-variabilité est indispensable pour contribuer aux enjeux sociétaux liés au climat et à sa variabilité, à la météorologie, à la pollution atmosphérique, à la dynamique des écosystèmes marins.

Explorer de nouvelles frontières notamment avec le monde «vivant». L'appropriation et la prise en compte des connaissances des sciences du vivant permettront à

la communauté OA d'en faire un thème de recherche à part entière indispensable à la compréhension des cycles biogéochimiques.

Développer une vision intégrée du système Terre. Les thèmes fondateurs de OA évoqués ci-dessus ont pour objet d'études trois grandes enveloppes du système Terre : l'océan, l'atmosphère et la cryosphère. Ces enveloppes sont en interaction au niveau de leurs interfaces représentant à la fois un lieu d'échange et de transformation de matière et d'énergie sous le contrôle de processus spécifiques. Ces trois enveloppes sont également en interaction avec d'autres compartiments du système Terre. C'est le cas à l'interface avec la zone critique et la Terre solide. Le questionnement scientifique lié à ces interfaces prend tout son sens si l'on considère qu'au sein du système Terre la matière et l'énergie évoluent au travers de cycles qui la font transiter d'un compartiment à l'autre.

Développer l'étude de l'anthropisation de la planète et de l'environnement. L'anthropisation est vue comme la détection, la caractérisation et l'attribution de l'influence croissante de l'humanité sur le fonctionnement bio-physico-chimique de la planète.

Consolider l'existant et innover dans les domaines de la mesure, des méthodes numériques et de la modélisation. La mise en œuvre de cette prospective va de pair avec le maintien, le développement ou l'évolution des outils et moyens.

La déclinaison de cette prospective en termes de priorités d'actions tant au niveau national qu'europpéen est limitée par la nature et la complexité de la structuration et du financement de la recherche au niveau national et international. Dans ce contexte il importe :

- De réaffirmer le rôle des équipes et des laboratoires.
- De conserver la maîtrise d'outils permettant de mettre en œuvre une partie de la prospective OA. Ceci passe en priorité par une augmentation progressive du budget du programme LEFE afin qu'il retrouve en 2022 le niveau de 2008.
- D'être plus performant dans le système national et européen d'orientation et de financement de la recherche.

Les avancées scientifiques attendues de cette prospective ne pourront pas être obtenues sans :

Un arsenal instrumental spatial, *in situ* et de laboratoire performant. Les efforts dans le domaine du développement instrumental doivent donc être poursuivis sur le plan du

développement des capteurs, des porteurs et de leur mise en réseau. L'interdisciplinarité et la mutualisation doivent être encouragées. La place de la DT du CNRS-INSU dans ce paysage doit être clairement définie et confortée. La jouvence des parcs instrumentaux au sens large doit être assurée.

Un riche tissu de services labélisés. Regroupés au sein des ANO du CNRS-INSU, ils doivent être soutenus, et leur intégration au sein des IR et TGIR nationales et des infrastructures européennes doit être renforcée. La réflexion sur leurs évolutions doit être poursuivie pour assurer la bonne adéquation avec le questionnement scientifique mis en avant dans cette prospective.

De grands moyens d'investigation. Pour les avions, le remplacement du Falcon par un nouveau jet en 2020 et le maintien de l'ATR sont indispensables. Pour les navires, les évolutions en cours au niveau de la FOF doivent conduire à un accès facilité au temps navire et aux moyens associés pour les activités de recherche ainsi qu'à une évolution des navires en accord avec les besoins de la recherche. Les ballons, drones et gliders représentent les compléments nécessaires aux investigations dans l'océan et l'atmosphère. Au sein du centre de carottage et de forage national, la réflexion sur l'archivage physique et numérique doit être engagée.

Des moyens de calcul haute performance, de stockage et la capacité à traiter, analyser et distribuer les gros jeux de données. Ceux-ci conditionnent aujourd'hui fortement les avancées scientifiques de la communauté OA ainsi que sa reconnaissance et sa visibilité à l'échelle européenne et internationale. Ils sont aussi des enjeux en termes de retombées socio-économiques. Ce travail de prospective a

été effectué par la communauté OA, en lien avec le travail de prospective réalisé au niveau du CNRS-INSU.

Des pôles de données performants. La construction des pôles de données (AERIS pour l'atmosphère, ODATIS pour l'océan) et leur insertion dans le pôle du système Terre doivent permettre l'accès à toutes les données existantes et leur intercomparaison. Cela favorisera la création de produits à valeur ajoutée combinant plusieurs sources d'information. C'est aussi un enjeu majeur de visibilité au niveau européen de nos services d'observation et infrastructures de recherche nationales, y compris pour leur insertion dans les services Copernicus.

Des ressources humaines appropriées. Ceci implique de maintenir le niveau des personnels IT permanents, de développer dans les unités une stratégie d'emploi à l'échelle au minimum d'un contrat quinquennal, d'étudier les possibilités innovantes de recrutement ouvertes par la loi sur l'économie sociale et solidaire, d'identifier parmi les emplois CDD ceux qui sont des fonctions nouvelles et préfigurent, donc, l'émergence de nouvelles thématiques ou techniques.

Pour la première fois, la prospective OA a aussi porté une réflexion dédiée sur le lien entre recherche et société, ce qui inclut la formation mais aussi les interactions avec les citoyens, les médias et les milieux socio-économiques. La médiation scientifique doit être développée, les relations directes entre citoyens et scientifiques doivent être privilégiées. Pour les relations recherche-industrie, la prochaine CSOA pourrait réfléchir à un cadre déontologique afin que les pratiques de la recherche de la communauté OA soient en adéquation avec les objectifs qu'elle affiche vis-à-vis de la société.



Bilan 2011-2016

Préambule

Lors du précédent exercice de prospective Océan Atmosphère (Fontaine 2011), 6 objectifs scientifiques prioritaires ont été identifiés :

1. 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 à l'échelle régionale ;
2. 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 ;
3. Étudier l'impact du changement global sur les milieux (océan, atmosphère, cryosphère) ;
4. 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 ;
5. Renforcer les synergies entre recherche fondamentale et applications opérationnelles ;
6. 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.

Le bilan présenté ci-dessous s'est donc en premier lieu focalisé sur les travaux et les résultats qui se sont situés dans le contexte de ces 6 objectifs. À la vue du nombre des résultats obtenus ce bilan n'a évidemment pas de caractère exhaustif. L'objectif est donc d'illustrer la diversité des questions abordées, des résultats obtenus ainsi que celle des approches utilisées. La période 2011-2016 a naturellement vu se développer des recherches au-delà des 6 objectifs. Une illustration de celles-ci est donc également présentée ainsi qu'une évolution du domaine de l'instrumentation.

Synergies entre études de processus et modélisation des enveloppes fluides

Les résultats présentés ci-après sont issus de projets s'inscrivant largement dans le cadre des grands programmes internationaux (IGBP). Ils ont été conduits dans des cadres programmatiques très variés (programmes du CNRS-INSU, ANR, projets européens...). Ils se sont aussi appuyés sur des observations ou les modélisations fournies par les services nationaux labélisés et les infrastructures de recherche nationales ou européennes. Les exemples de ces travaux présentés ci-dessous sont regroupés en quatre ensembles selon le type d'approche développée.

■ Amélioration des paramétrisations et prise en compte de nouveaux processus dans les modèles

Il s'agit de travaux basés sur des observations ayant mené à la prise en compte de nouveaux processus dans les modèles ou à l'amélioration de paramétrisations existantes.

Des améliorations de la représentation des éruptions volcaniques dans les modèles globaux ont été obtenues grâce à différents types de mesures. Par exemple, la mesure des concentrations de nanoparticules volcaniques secondaires a mis en évidence que ces concentrations étaient sous-estimées de 7 à 8 ordres de grandeur par les modèles globaux. Une autre étude a démontré que, contrairement à ce que l'on pensait, les gaz halogénés d'origine volcanique peuvent conduire à un appauvrissement significatif de l'ozone stratosphérique et qu'ils doivent donc être pris en compte dans la modélisation



Figure 1. Panache plinien de l'éruption du Sarychev (Russie), le 12 juin 2009. @ NASA

de l'évolution future de la couche d'ozone. La reconstruction du refroidissement induit par les volcans indonésiens (en 1257 et 1815) à partir des cernes de croissance des arbres a montré que les perturbations du bilan radiatif dues à l'activité volcanique étaient largement surestimées dans les simulations utilisées dans le dernier rapport du GIEC.

■ Augmentation de la résolution des modèles

Une nouvelle vision de la dynamique océanique a émergé ces dix dernières années rendant compte de la turbulence océanique omniprésente sur les images satellite de température de surface et de couleur de la mer et liée aux tourbillons de moyenne échelle (de 200 km à 300 km de diamètre) connus pour représenter près de 80 % de l'énergie cinétique de tous les mouvements océaniques. De cette vision ont également émergé des structures de plus petites échelles, tels les filaments allongés de moins de 10 km de large ou les fronts de température de surface. Des études ont ainsi montré l'importance décisive des processus dynamiques de fine échelle concernant le mélange de masses d'eau dans l'Atlantique Sud, l'évolution des tourbillons de petite et moyenne échelle dans le Pacifique Nord, ou la structure de la zone de minimum d'oxygène du Pérou.

Une étude a également montré que les processus océaniques turbulents de petite échelle (10 à 200 km) contribuent à la variabilité interannuelle des courants océaniques et du niveau de la mer, et qu'une part importante de la variabilité interannuelle de ce niveau est chaotique et générée par l'océan, sans forçage direct par l'atmosphère. Des simulations de l'océan global à très haute résolution spatiale (maille élémentaire de $1/12^\circ$, soit moins de 10 km) ont montré que la circulation méridienne moyenne est actuellement dans un régime bi-stable, en accord avec les observations et réanalyses océaniques, alors que dans les modèles à plus basse résolution spatiale la circulation méridienne moyenne est dans un état mono-stable. Ces résultats suggèrent que la circulation méridienne pourrait ralentir brutalement et non pas de manière progressive comme le prévoient les simulations climatiques effectuées jusqu'ici, notamment dans le cadre du GIEC. Une configuration haute résolution du modèle couplé océan-banquise NEMO-LIM3 a été développée autour du Svalbard permettant de mettre en évidence de nombreux processus d'interaction océan-glace à petite échelle. Le modèle de banquise LIM3 permet de prendre en compte la distribution sous-maille des épaisseurs et de représenter les variations de salinité dans la glace.

Un autre ensemble de travaux s'est focalisé sur l'amélioration de la prise en compte de la turbulence dans les modèles atmosphériques, notamment au travers de la représentation

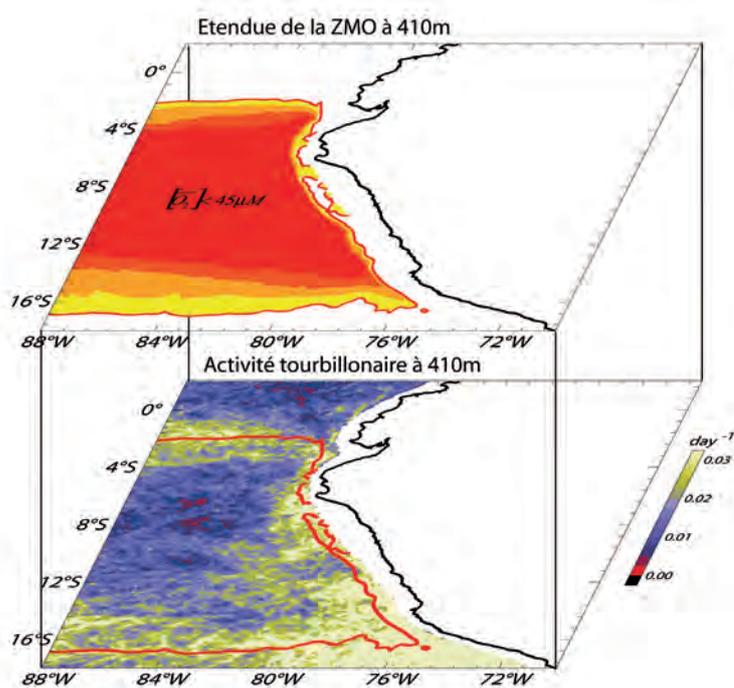


Figure 2. (en haut) Étendue de la zone de minimum d'oxygène (où la concentration en oxygène est inférieure à $45 \mu\text{M}$) au large du Pérou, simulée par un modèle régional haute résolution à 400 m de profondeur, et (en bas) carte de l'activité tourbillonnaire permettant de voir qu'elle est maximale aux frontières nord et sud de la ZMO (les zones fortement tourbillonnaires sont en jaune). Bettencour et al.

du cycle diurne de la convection en milieu semi-aride ou des processus turbulents de couche limite atmosphérique. Des progrès ont également été réalisés dans la représentation de la chimie sous-maille associée aux oxydes d'azote émis par les éclairs et l'étude de l'impact de différents types de paramétrisation de la turbulence dans les nuages a montré que certains d'entre eux étaient plus efficaces que d'autres pour simuler les orages.

■ Analyse d'observations à l'aide de simulations

Plusieurs études ont croisé modélisation et données paléoclimatiques sur le dernier millénaire et mis en évidence l'impact des éruptions volcaniques sur les variations du climat et de la circulation océanique au cours de cette période. Des simulations ont permis d'analyser les variations de la North Atlantic Oscillation (NAO) et d'identifier l'apparition quasi systématique d'une phase positive de la NAO, deux ans après chacune des 11 éruptions volcaniques les mieux connues du dernier millénaire. Une étude a également montré que les éruptions volcaniques sont vraisemblablement à l'origine du refroidissement des océans observé au cours des 1000 dernières années et interrompu par le réchauffement global. Une autre étude a mis en évidence l'existence de cycles d'environ 20 ans pour les courants et la température de surface de l'Atlantique Nord, ainsi que pour la température de l'air au-dessus du Groenland, qui semblent être initiés par les éruptions volcaniques et pourraient expliquer la variabilité récente des courants de l'Atlantique.

Des travaux de modélisation ont permis de mieux comprendre l'évolution des calottes de glace et des glaciers. Des simulations climatiques ont par exemple montré que les principales fluctuations des glaciers tropicaux au cours des 20 000 dernières années s'expliquent par les variations de

température et non de précipitations. Un résultat opposé a été obtenu pour le glacier subantarctique des îles Kerguelen.

Par ailleurs, l'analyse des simulations CMIP5 et de nouvelles simulations a confirmé le rôle de la variabilité naturelle du Pacifique tropical dans le ralentissement du réchauffement global observé de 1998 à 2012, l'intensification des alizés ayant vraisemblablement provoqué un transfert de chaleur de la surface vers la subsurface de l'océan Pacifique tropical.

Des simulations ont également montré que l'anomalie de concentration élevée d'ozone observée par satellite et par des mesures *in situ* par avion entre l'Afrique et l'Inde dans la haute troposphère s'explique par l'émission d'oxydes d'azote par les éclairs au-dessus de l'Afrique centrale.

■ Amélioration des prévisions décennales

Ces cinq dernières années ont vu l'émergence de la problématique des prévisions décennales au niveau international. Les groupes français ont eu une participation active et pionnière dans la mise en place et l'analyse des systèmes de prévisions décennales. Ces prévisions tiennent compte non seulement des forçages externes (gaz à effet de serre, etc.), mais également de la variabilité interne du système climatique (Atlantic Multidecadal Variability (AMV), etc.). Des techniques d'assimilation de données adaptées aux modèles climatiques ont été développées, de manière à obtenir un état initial pour ces modèles en meilleur accord avec les observations des 60 dernières années, notamment en matière de phase des grands modes de la variabilité climatique comme l'AMV. Les prévisions rétrospectives partant de ces états initiaux ont montré une prévisibilité accrue dans certaines régions (Atlantique Nord...) en comparaison des simulations non initialisées, avec une dispersion également plus faible.

Étudier l'impact du changement global sur les milieux

■ Interaction océan-atmosphère

Depuis une dizaine d'années, les événements El Niño semblent impacter davantage le centre que l'est du Pacifique tropical. Ce type d'El Niño existait déjà dans le passé mais il survenait moins souvent qu'aujourd'hui. Serait-ce une conséquence du réchauffement climatique? L'un des effets du réchauffement global pourrait être un doublement de la fréquence des événements El Niño extrêmes au cours du XXI^e siècle. Enfin, le dipôle de l'océan Indien, contraste de température entre l'est et l'ouest du bassin, est de plus en plus fréquent depuis 30 ans. Le nombre d'événements météorologiques extrêmes qu'il provoque pourrait augmenter dans les années à venir du fait du changement climatique.

L'évolution de la salinité de surface des océans Atlantique et Pacifique tropicaux sur les dernières décennies indique une accentuation des contrastes spatiaux entre et à l'intérieur des bassins océaniques, les eaux peu salées devenant encore plus douces et les eaux très salées encore plus salées. Cette accentuation pourrait bien être due à l'augmentation de la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre (GES).

Un ensemble de projections climatiques régionales, le plus complet à ce jour pour la mer Méditerranée, met en évidence

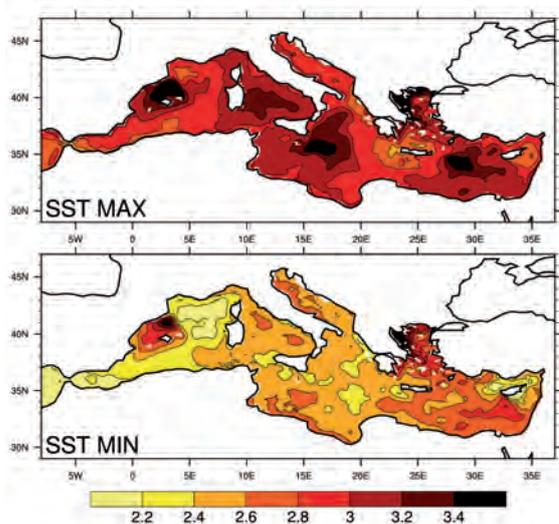


Figure 3. Cartes des anomalies minimales et maximales de température de surface prévues par l'ensemble de simulations à la fin du XXI^e siècle (par rapport à la fin du XX^e siècle). Adloff F., et al.

un réchauffement de 2 à 4 °C des eaux de surface d'ici à la fin du siècle et des modifications dans la circulation océanique dans le bassin.

Les conditions météorologiques et le transport sont sujets au changement climatique. Un accent a été mis sur l'étude de l'influence du transport depuis des sources naturelles particulièrement intenses et mal quantifiées : les feux de végétation, les volcans et les soulèvements de poussières minérales. Le soutien à la mise en place de campagnes de mesures ou de stations sol, ainsi que les travaux de modélisation et d'analyse d'observations satellite ont permis une meilleure compréhension et quantification des sources, mais également de leur transport (par exemple de la pyroconvection dans le cas des feux) et de l'évolution chimique des panaches au cours du transport. Les concentrations de CO₂ de plus en plus élevées auront pour effet d'augmenter les émissions globales de l'isoprène issues de la végétation, mais selon les sorties du modèle ORCHIDEE cette augmentation sera partiellement compensée par les modifications prévues de l'utilisation des sols. La forte vulnérabilité de zones éloignées des sources, comme l'Arctique ou l'Himalaya, au transport à longue distance de panaches issus d'émissions anthropiques, depuis l'Asie et l'Amérique du Nord notamment, a également été mise en évidence. Les vents du Sahara dispersent de telles quantités de poussières à travers la planète que celles-ci modifient le climat. Aucune relation univoque entre ces poussières et le climat n'a pu être établie jusqu'à présent. Un nouveau modèle prédit que ces émissions de poussières sahariennes vont diminuer au fil des cent prochaines années. Cela pourrait avoir des effets bénéfiques pour la santé des populations, mais pourrait également réchauffer l'océan Atlantique tropical Nord, le rendant plus propice à la formation et au développement des cyclones tropicaux.

■ Séquestration du carbone

La compréhension des mécanismes physique et biologique qui mènent à la séquestration du carbone dans les océans est essentielle pour estimer le devenir des émissions anthropiques de CO₂. La reconstruction des données de pression partielle de CO₂ sur l'océan global a mis en évidence un accroissement significatif du puits de carbone océanique depuis les années



Figure 4. Le navire océanographique Marion Dufresne (IPEV) dans les vagues et les forts vents d'ouest des quarantièmes rugissants dans l'océan Austral. © LOCEAN/Ecce Terra, Nicolas Metzl

2000 et une plus grande variabilité interannuelle de ce puits que celle déduite des modèles océaniques. Ce résultat est conforté par des études locales, notamment dans l'océan Austral où le puits de carbone s'est revigoré au cours de la dernière décennie.

Localement, la circulation océanique peut avoir un impact très important sur la séquestration du carbone, bien supérieur à celui dû à l'activité biologique. Cela a été le cas en Atlantique Nord, dans la région étudiée par le programme POMME, où elle jouerait un rôle 100 fois plus important que la voie biologique. De même, le lien entre le ralentissement de la circulation thermohaline méridienne et la réduction de l'absorption du carbone anthropique dans l'Atlantique Nord a été démontré pour la période entre 1997 et 2006.

La séquestration du carbone par les processus biogéochimiques dans l'océan profond résulte d'une multitude de processus complexes et interconnectés dépendant des propriétés des différents acteurs (micro et macro organismes) et de leurs interactions au sein des écosystèmes. Par exemple, il a été montré que les changements à grande échelle des conditions climatiques peuvent engendrer des modifications rapides de la composition des communautés phytoplanctoniques, dont il convient de tenir compte dans les études sur la sensibilité des différents cycles biogéochimiques marins aux variations climatiques. De manière encore plus spécifique, il a été montré que l'export de carbone dépend des différentes espèces présentes au sein de la communauté des diatomées australes. Dans l'océan Arctique l'augmentation du CO₂ favoriserait plutôt les petites classes de taille de phytoplancton, moins performantes pour la séquestration du carbone. En analysant un grand jeu de données collectées dans tous les bassins océaniques de moyennes et basses latitudes, il a également été démontré que la présence d'un petit nombre de gènes

bactériens et viraux pouvait expliquer la variabilité de l'export de carbone vers les profondeurs océaniques. Pour les communautés zooplanctoniques, une étude à grande échelle menée en Méditerranée nord-occidentale a mis en évidence le rôle essentiel joué par ces organismes dans le transfert, des côtes vers le large, du carbone organique.

Plus globalement, un modèle couplé hydrodynamique – biogéochimie de la Méditerranée nord-occidentale montre que la contribution d'un écosystème planctonique au stockage du carbone ne changerait pas significativement d'ici la fin du XXI^e siècle. En revanche, le réchauffement et l'appauvrissement en nutriments de la couche de surface favoriseraient le développement du plancton de petite taille.

L'impact du changement climatique ne concerne pas que les premiers échelons trophiques. En Europe, l'algue brune *Laminaria digitata*, d'un intérêt à la fois écologique et économique, pourrait disparaître de certaines côtes dès le milieu du siècle dans le contexte d'un réchauffement modéré à fort, une évolution qui aura des répercussions sur la biodiversité et la ressource halieutique des régions. Des travaux de modélisation montrent que même les écosystèmes les plus inaccessibles de l'océan profond ne sont pas à l'abri des impacts du changement climatique et que leur biomasse devrait connaître une forte diminution.

■ Acidification des océans

L'augmentation du CO₂ atmosphérique conduit à une acidification de l'océan et en premier lieu des eaux de surface. Plusieurs études ont permis d'améliorer notre compréhension des mécanismes d'adaptation des organismes face à cette perturbation. La sécrétion du squelette calcaire d'une espèce de micro-algues, les coccolithophores, diminue quand les



Figure 5. Expérience EPOCA, Ny-Ålesund, Spitzberg 2010. Mésocosme avec un glacier en arrière-plan. © Jean-Pierre Gattuso.

eaux marines deviennent plus acides, mais certaines souches hyper-calcifiées, de zones côtières chiliennes, se sont adaptées aux milieux les plus corrosifs. D'autre part certains organismes calcifiants protègent leur coquille pour résister à l'acidification croissante de l'eau de mer. Malgré tout, leur résistance est amoindrie quand les organismes sont exposés à une température élevée durant une longue période, ce qui pourrait accroître la fréquence des épisodes de mortalité de ces organismes. Le plancton calcaire de l'océan Atlantique Nord-Est réagit actuellement davantage à l'augmentation des températures qu'à l'acidification des océans.

■ Climat en Europe

La communauté française utilise activement les simulations du GIEC pour affiner les projections du climat. En Europe, dans le cas du scénario d'émission des GES dit « du laisser-faire », l'occurrence des records de chaleur durant l'été à la fin du XXI^e siècle serait multipliée par 10, alors que celle des records d'événements froids deviendrait quasi nulle par rapport à une situation en l'absence d'influence humaine. En France, le réchauffement pourrait atteindre 3.8°C en moyenne annuelle d'ici la fin du XXI^e siècle et serait plus élevé en été qu'en hiver. D'ailleurs, l'été débute aujourd'hui environ 10 jours plus tôt que dans les années 1960. Au rythme actuel, le début de l'été sera encore plus précoce d'environ 7 jours à la fin du XXI^e siècle. Les projections montrent par ailleurs un accroissement sensible de la fréquence des événements extrêmes au cours du XXI^e siècle.

Plus localement, une analyse statistique de données de précipitations montre que le risque de précipitations d'intensité égale ou supérieure aux plus fortes pluies de l'automne 2014 dans les Cévennes pourrait avoir triplé en moyenne depuis 1950. Sans que l'on puisse affirmer pour l'instant qu'il y a un

lien entre cette augmentation et le réchauffement climatique, une seconde étude montre qu'au sud-est de la France, les pluies extrêmes ont connu une relative stabilité des années 60 jusqu'au milieu des années 80, suivie d'une augmentation jusqu'à nos jours. Les risques de mortalité massive dus à des stress thermiques dans les écosystèmes côtiers benthiques de la Méditerranée nord-occidentale ont été modélisés.

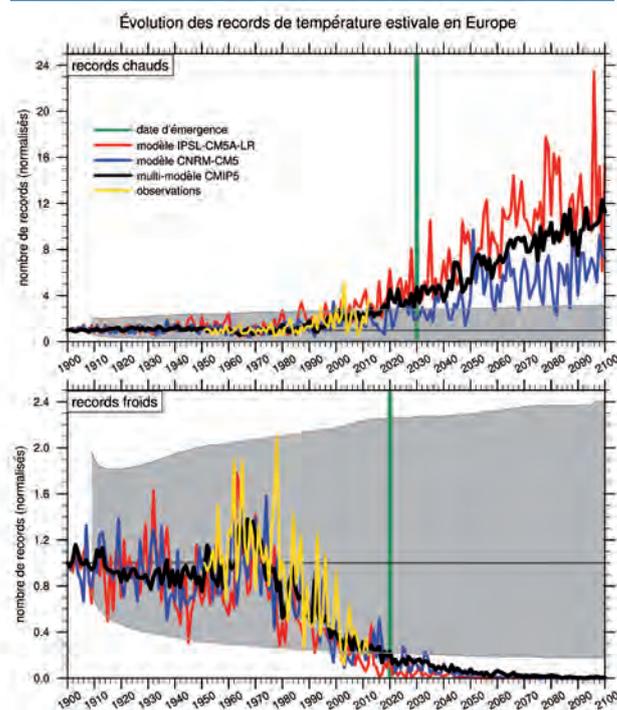


Figure 6. Évolution de l'occurrence normalisée des records de température estivale en Europe : occurrence observée, modélisée avec le scénario du laisser-faire et calculée pour un climat stationnaire (enveloppe grisée). Terray, L. et al.

■ Niveau de la mer

Il est établi que la hausse du niveau des océans observée depuis plus d'un siècle dans les enregistrements marégraphiques est expliquée, dans deux tiers des cas, par l'impact des activités humaines. Régionalement, l'évolution du niveau de la mer de 1950 à nos jours a été évaluée dans le Pacifique tropical ouest. Dans certaines îles, les chercheurs constatent une hausse totale de ce niveau par rapport à leurs rivages 3 fois supérieure à la hausse moyenne de l'océan mondial.

Plusieurs études se sont intéressées à l'impact de la fonte de la calotte antarctique. Il y a 14 600 ans, début de la 1^{re} période chaude qui marqua la fin de la dernière glaciation, le niveau de la mer a connu une hausse de presque 14 mètres en seulement 350 ans. L'instabilité de la calotte antarctique face à cette perturbation climatique majeure a été mise en évidence. Ce résultat impose un regard nouveau sur la contribution de la calotte antarctique à la remontée du niveau des mers. Au

cours des 20 dernières années, de nombreuses plateformes de glace en Antarctique ont vu leur étendue se réduire. En conséquence, l'écoulement de nombreux glaciers émissaires s'est accéléré, ce qui a augmenté la décharge de glace vers l'océan et ainsi contribué à élever le niveau des mers. À l'aide d'un modèle numérique d'écoulement des glaces, une équipe de chercheurs a pu quantifier le soutien mécanique exercé par les plateformes antarctiques sur leurs glaciers émissaires et pointer les régions susceptibles d'être affectées par une perte d'étendue de ces plateformes. Les mesures aéroportées et satellite sur la période 2001-2006 ont montré que les glaciers amont s'amincissent suite aux dislocations des plateformes antarctiques, avec des amincissements encore importants 10 années après la désintégration des plateformes. Enfin, en confrontant modèles et observations les chercheurs ont montré que l'effondrement d'une partie de la calotte glaciaire en Antarctique participerait à la montée du niveau des mers avec une contribution de 10 cm en 2100. Il y aurait un risque sur vingt que cette contribution soit de plus de 30 cm en 2100 et de plus de 72 cm en 2200. Mais la montée des eaux due à l'effondrement de l'Antarctique sera probablement plus lente que ne le suggéraient les précédentes projections.

La part des glaciers dans la hausse du niveau de la mer reste débattue car elle n'a pu être estimée qu'à partir du suivi d'un nombre limité de glaciers. Des estimations plus fines de leur perte de masse entre 2003 et 2009 ont été avancées grâce aux observations de deux missions satellite (GRACE et ICESat). Ces travaux indiquent que les glaciers sont responsables de 30 % de la hausse du niveau des mers pour cette période faisant ainsi jeu égal avec les calottes antarctique et groenlandaise réunies. Les toutes dernières études montrent que si les émissions de GES se poursuivent au rythme actuel, la fonte des glaces pourrait altérer la circulation océanique et (i) renforcer la perte de masse de l'Antarctique et accélérer l'élévation du niveau de la mer ; (ii) limiter l'ampleur du réchauffement tout en renforçant l'intensité des tempêtes dans certaines régions.

■ Cryosphère

● Banquise

La banquise arctique subit un déclin spectaculaire. La vitesse d'amincissement de la banquise est près de quatre fois plus rapide que celle calculée par les modèles. Ce biais est dû à



Figure 7. Neige fondante contenant des impuretés absorbantes. © Rémi Maupetit

Étudier l'impact du changement global sur les milieux

une mauvaise représentation de la dérive des glaces de mer, et donc de leur évacuation vers le sud hors du bassin arctique. Une meilleure prise en compte de ce mécanisme suggère la disparition de la banquise arctique estivale, bien avant la fin du siècle. La diminution de la banquise estivale arctique s'est accélérée récemment, avec de fortes disparités régionales dans l'année du déclenchement de cette accélération, plus précoce d'une décennie dans l'Arctique canadien et plus tardive mais plus accentuée dans le secteur Atlantique.

La neige recouvrant la calotte groenlandaise au printemps est moins « blanche » depuis 2009 à cause d'un accroissement des dépôts d'impuretés. Cette poussière minérale serait rendue disponible par une fonte plus précoce de la couverture neigeuse saisonnière aux hautes latitudes. Cet assombrissement de la calotte contribue à sa fonte accélérée et pourrait amplifier le changement climatique sur la calotte. Par ailleurs, l'augmentation des chutes de neige en Antarctique pourrait amortir le réchauffement climatique futur sur ce continent. La hausse des températures impliquera des précipitations accrues et donc une neige plus « blanche » qui réduira l'amplitude du changement climatique au centre du continent. Ces travaux révèlent une boucle de rétroaction négative agissant sur les températures et sous-estimée jusqu'à présent.

• Glaciers

L'impact des GES sur les fontes de glaciers continue d'être exploré. Les glaciers tropicaux des Andes ont déjà perdu 30 à 50 % de leur surface depuis 4 décennies. Une étude menée sur 21 glaciers andins montre que ces glaciers intègrent des influences climatiques des deux hémisphères (et non majoritairement de l'hémisphère nord). Le recul du glacier Telata (Bolivie) sur les 10 000 dernières années est lié à une hausse de température atmosphérique de 3°C et au réchauffement de l'océan Pacifique tropical en réponse à une augmentation de l'insolation. Dans l'Himalaya, les données satellite montrent que, contrairement au cas des autres glaciers himalayens, la masse des glaciers du Karakorum a légèrement augmenté de 1999 à 2008. D'ailleurs, en combinant des mesures satellite et des mesures de terrain obtenues entre 1988 et 2010, une équipe franco-indienne vient de montrer que la masse des glaciers du Lahaul Spiti, au cœur de l'Himalaya, avait légèrement augmenté entre 1988 et 1999 avant de diminuer et que leur perte de masse entre 1988 et 2010 était quasi six fois plus faible que celle des glaciers alpins durant la même période. Ce résultat remet en question les compilations précédentes qui laissaient entendre une perte de masse glaciaire continue et massive des glaciers de l'Himalaya au cours des dernières décennies.



Figure 8. Le glacier Ritacuba negro, dans les Andes colombiennes. © IRD / Bernard Francou

■ Santé

Le méthyle-mercure (CH_3Hg) est la forme toxique du mercure qui est ingérée par les organismes vivants. Elle s'accumule tout au long de la chaîne alimentaire, pouvant atteindre, en bout de chaîne, des concentrations un million de fois plus fortes que celles mesurées dans les eaux de surface. Un inventaire global du mercure anthropique suggère que, dans l'océan de surface et l'océan intermédiaire (au-dessus de 1000 mètres de profondeur), les concentrations de mercure ont triplé depuis la révolution industrielle. Plus localement, des mesures dans l'océan Arctique central montrent que du méthyle-mercure est produit à l'endroit de la production planctonique primaire, ce qui pourrait expliquer les taux très élevés de mercure observés chez les animaux du sommet de la chaîne trophique. Le réchauffement de l'Arctique pourrait mener à une plus grande production de méthyle-mercure marin. En bloquant le rayonnement solaire, la banquise arctique empêcherait la dégradation et limiterait le transfert vers l'atmosphère des formes toxiques du mercure présent dans les eaux de surface de l'océan Arctique. La fonte de la banquise au cours des décennies à venir influencera de manière significative le cycle biogéochimique de ce polluant.

Les concentrations dans l'air du pollen d'ambrosie à feuilles d'arrose, très allergisant, pourraient avoir quadruplé en Europe à l'horizon 2050. Le changement climatique serait responsable des deux tiers de cette augmentation, le tiers restant serait dû quant à lui à la colonisation de la plante, favorisée par les activités humaines.

Synergies entre recherche fondamentale et applications opérationnelles

■ Développement et validation des modèles de prévision

L'amélioration des modèles opérationnels pour la prévision du temps, de l'océan, de la qualité de l'air ou du devenir du climat se nourrit en amont des résultats de la recherche. Ceux-ci permettent tout d'abord d'identifier les défauts des modèles et leurs sources en confrontant les modèles à la réalité et en réalisant des études de sensibilité. Le programme HyMeX a mis en œuvre de nombreuses études de ce type. L'une d'entre elles a par exemple montré que le positionnement et la quantité d'eau précipitée lors des événements orageux de type cévenol ne dépendent pas que de l'orographie, mais aussi de plusieurs processus de basse couche se développant tant en mer que sur terre (formation d'un dôme d'air dense et froid à la base du relief) dont il faut s'assurer la bonne représentation dans le modèle si l'on veut les prévoir précisément. Un autre exemple dans le domaine du climat est l'étude du bilan en eau et en chaleur du bassin méditerranéen qui a montré qu'une partie importante de la tendance observée sur la température de surface provient de la diminution de la charge en aérosols sulfatés en Europe à partir des années 1980 qui n'était pas représentée jusqu'alors dans les modèles. Dans le domaine de l'océanographie, une étude de sensibilité récemment publiée porte sur la couverture de glace en Arctique modélisée dans le cadre du projet Ocean ReAnalyses Intercomparison Project (ORA-IP) et pointe les sources majeures d'incertitude, dont les biais du modèle de glace de mer.

Les points de faiblesse des modèles étant identifiés, il faut y remédier en développant ou en améliorant la représentation physique des processus en cause. Ce fut le cas pour ce qui est du rôle des aérosols dont on cherche à améliorer la représentation dans les modèles de qualité de l'air ou de climat où ils constituent une source majeure d'incertitude. C'est ainsi qu'une nouvelle paramétrisation a été développée et testée à l'aide des observations réalisées pendant HyMeX pour rendre compte de la transformation des aérosols en gouttes d'eau nuageuses. Appelée LIMA, elle cherche à décrire le spectre dimensionnel des particules dont on a besoin pour calculer l'effet radiatif.

Les campagnes de recherche sont aussi l'occasion de tester les modèles et leurs évolutions avant leur passage en opérationnel. Ce fut le cas par exemple pour le modèle de prévision météorologique AROME dont l'échéance a été portée à 36 heures après avoir démontré la pertinence de ce choix pendant HyMeX, ou le développement de la prévision d'ensemble à échelle kilométrique dans le cadre du même programme.

■ Nouvelles observations pour l'opérationnel

La recherche en sciences de l'atmosphère et de l'océan repose sur des observations pour lesquelles un travail de développement technologique est continuellement conduit. Si certaines solutions proposées par la recherche ne présentent pas d'intérêt direct pour l'opérationnel, d'autres ont au contraire un avenir possible au sein des réseaux opérationnels déployés pour servir les besoins de prévision. Dans le domaine de la qualité de l'air, on notera par exemple le déploiement en France d'un réseau de lidars aérosols. Ceci a été permis par l'expertise de premier ordre acquise par la communauté française et la démonstration qui fut faite en 2010 de l'apport de ce type d'instrument dans la gestion de la crise du volcan islandais de 2010, et les travaux réalisés depuis pour préciser quelles informations on peut en tirer.

Grâce aux compétences acquises, la communauté française a pu proposer avec succès de nouveaux systèmes d'observation, notamment depuis l'espace, et développer leur utilisation opérationnelle au-delà parfois de ce qui était initialement envisagé. On pourra citer les travaux sur l'assimilation dans les modèles de qualité de l'air des données du lidar franco-américain CALIPSO qui préfigure à bien des égards ce que sera l'assimilation des observations sur les aérosols des futurs satellites européens Aeolus et Earth-Care. On pourra citer aussi l'assimilation par Météo-France des observations d'humidité du sondeur SAPHIR du satellite franco-indien Megha-Tropiques dont l'apport avéré à la prévision d'ARPEGE est un argument pour lui donner une suite opérationnelle. Dans le domaine de la qualité de

l'air, des développements réalisés autour du sondeur spatial opérationnel IASI permettent d'extraire aujourd'hui des mesures de concentration en gaz qui ne faisaient pas partie de la mission principale du satellite. Ces mesures bénéficient de la continuité du sondeur justifiée par la météorologie opérationnelle et contribuent en retour à l'amélioration de la prévision de la qualité de l'air. En océanographie, le développement en cours d'une mission spatiale telle que SWOT devrait apporter à l'observation de la surface océanique la résolution nécessaire à l'amélioration de sa modélisation dans des modèles opérationnels de plus en plus finement résolus (1/36° de degré actuellement pour le modèle opérationnel de Mercator Océan).

Certains développements instrumentaux ont donné lieu à des transferts de technologie vers l'industrie (radar 95GHz BASTA ou sonde aérosols LOAC par exemple), préalable à une utilisation opérationnelle future (pour la prévision du brouillard pour le premier ou la gestion des crises volcaniques pour le second).

■ Utilisation des données opérationnelles (observations et réanalyses) par la recherche

Les services opérationnels produisent pour leurs propres besoins des données potentiellement utiles pour la recherche. C'est le cas pour les observatoires qui peuvent trouver dans les bases des services opérationnels d'observation des données pour contextualiser leurs propres mesures, plus précises et plus exhaustives, mais à la représentativité très locale. Grâce à l'apport des radiosondages de Météo-France à Trappes (améliorés pour l'occasion), le SIRTa a pu, par exemple, candidater pour devenir une station de référence du programme international GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN). Les réseaux opérationnels peuvent par ailleurs constituer le noyau d'un dispositif d'observation de campagne offrant une observation certes réduite en termes de variables, mais continue et de long terme. Ce fut le cas pendant les campagnes du programme HyMeX.

Les données opérationnelles offrent une continuité et une profondeur temporelle ouvrant la possibilité de réaliser des études climatiques. Celles-ci passent souvent par la constitution de ce que l'on appelle des réanalyses qui consistent à assimiler des données acquises pendant plusieurs années, voire décennies, à l'aide d'un modèle récent. À titre d'exemple, de telles réanalyses ont permis de constater l'avance du début de l'été depuis 1960 et d'en attribuer la cause aux gaz à effet de serre et aux aérosols.

Dans le cadre de l'expérience DEWEX, plusieurs activités opérationnelles ont été menées, principalement liées à l'utilisation de plateformes autonomes de mesures biogéochimiques. La grande quantité de profils biogéochimiques obtenus (environ 10 000 pour les gliders et 500 pour les flotteurs), couplée à la présence simultanée des bateaux de recherche, a permis d'avancer dans la définition des protocoles de contrôle qualité des paramètres biogéochimiques.

Les analyses opérationnelles ont été un outil majeur pour l'analyse des observations de l'expérience DEWEX. Une méthode simple, permettant de tirer parti des observations locales pour corriger efficacement les biais des analyses, a été mise au point. Il est ainsi possible de tirer parti de la synergie entre l'observation à long terme MOOSE et les analyses opérationnelles pour modéliser correctement et à haute résolution une zone clé de la Méditerranée.

■ L'apport des mathématiques

L'assimilation ou la combinaison d'un modèle et d'observations a été et continue d'être un grand facteur de progrès pour la qualité des prévisions numériques. Elle est utilisée aussi bien pour la prévision météorologique qu'océanique. Si des techniques de base ont émergé, leur qualité repose entre autres sur une bonne spécification des matrices de variance/covariance des erreurs des observations et des modèles. Si pour les premières une bonne connaissance des instruments de mesure apporte la réponse, la matrice est bien plus difficile à construire pour les secondes. Elles ne dépendent pas en effet seulement du modèle mais aussi de la situation météorologique ou océanique. De nombreuses recherches conduites avec le soutien du programme national LEFE/MANU tentent donc d'apporter des solutions pour spécifier des matrices de variance/covariance des erreurs valables pour la situation rencontrée. Une approche consiste à réaliser non plus une, mais un ensemble de prévisions sur la base de conditions initiales perturbées et d'observer la dispersion des résultats obtenus. La difficulté consiste alors à spécifier la matrice à partir d'un ensemble de taille limitée (une centaine au mieux).

■ Contribution à la constitution de nouveaux services opérationnels

À l'échelon européen, la recherche a permis à la communauté française d'accéder à des places de choix dans les services du programme européen Copernicus. C'est tout particulièrement le cas pour l'océanographie opérationnelle avec la délégation de service CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring

Service) obtenue par Mercator Océan. Le service continue de se développer en intégrant les résultats de la recherche. Une tendance actuelle porte sur la représentation de plus en plus fine de l'état de surface et une autre sur la couleur de l'eau qui conditionne la pénétration de l'énergie solaire dans l'océan. Toutes deux s'appuient sur des études de processus démarrées il y a 10 ou 20 ans et l'amélioration des capacités d'observation. La mesure de la couleur de l'eau est maintenant mesurée par plusieurs satellites opérationnels (dont METOP et METEOSAT) et continuera à l'être avec SENTINEL 3.

Encourager les recherches sur les processus spécifiques aux interfaces

Pour soutenir cet objectif et stimuler la réalisation de projets à l'interface continent-océan, une action commune LEFE/EC2CO a été initiée lors de l'appel d'offres 2015 et renouvelée en 2016. Les résultats issus de cette initiative n'apparaîtront que lors du prochain bilan, mais les études aux interfaces conduites dans d'autres domaines programmatiques ont été riches et fructueuses.

■ Interface océan-atmosphère

À cette interface, les études se sont focalisées sur la caractérisation des flux, leur variabilité et leur modélisation. Pour les flux de chaleur, les observations réalisées par vent fort en Méditerranée occidentale pendant HyMeX sur la température de surface de l'eau de mer et sur les paramètres de la couche limite marine de surface ont mis en évidence des écarts par rapport aux prévisions du modèle AROME. Ceci a conduit à une nouvelle paramétrisation des flux turbulents air-mer dans ce modèle. Pour les flux de CO_2 , la connaissance des flux air-mer a été renforcée aussi bien en milieu océanique (voir chapitre séquestration du carbone) qu'en milieu côtier. Pour ce dernier, l'étude de ces échanges dans le golfe du Lion a montré que cette région est un puits de CO_2 hivernal fortement influencé par la température de l'eau et la circulation. La dynamique saisonnière de ces flux est fortement influencée par le panache du Rhône. Toujours en milieu côtier, une nouvelle méthode (flux engine) a été développée pour quantifier le puits annuel de CO_2 dans les mers bordant l'Europe du Nord et étudier à fine échelle ses variations spatiales. La connaissance du devenir des flux de poussières entrant dans l'océan a été renforcée, des études de laboratoires ont permis de démontrer que la solubilité dans l'eau de mer du fer des poussières sahariennes était fonction de la minéralogie. De plus, l'impact des dépôts atmosphériques de poussières sahariennes sur la biogéochimie des eaux de surface méditerranéennes a été étudié en détail en utilisant pour la première fois des mésocosmes *in situ*. Les émissions océaniques de carbone volatile sous forme de composé tel que le monoxyde de carbone ou l'isoprène ont fait l'objet de nouvelles modélisations.

■ Interface continent-océan

Des approches multi-plateformes (gliders marins, bouées côtières et stations benthiques) ont permis d'améliorer



Figure 9. Mésocosme de la campagne DUNE. © D. Luquet

l'observation du transfert et de la transformation de la matière particulaire et dissoute lors des événements extrêmes. Ces observations ont montré l'importance de la resuspension au niveau des zones de dépôt du pro-delta du Rhône. Les fortes érosions sédimentaires nourrissent le transport de matériel hors du pro-delta vers le plateau lors des épisodes de tempêtes. La remise en suspension du sédiment s'accompagne d'une intensification de la consommation d'oxygène liée à la réoxydation du sédiment réduit. Par ailleurs, des études réalisées dans le pro-delta du Rhône montrent que la diversité de la macrofaune benthique est liée aux apports fluviaux mais qu'elle n'a qu'un impact réduit sur la reminéralisation.

L'impact de grandes agglomérations côtières méditerranéennes sur la zone côtière a été évalué en matière de source de contaminants chimiques. La contamination sédimentaire semble affecter la diversité des communautés bactériennes et peut être transférée à travers les compartiments abiotiques (sédiments/eau) pour impacter par la suite certains organismes.

Les sédiments en tant que sources de matière pour l'océan du large ont aussi été l'objet de recherche. Dans l'ouest du Pacifique, une source de fer jusqu'alors négligée résultant d'une libération non réductrice du fer des sédiments a été mise en évidence et son empreinte a pu être suivie de la côte de Papouasie Nouvelle-Guinée jusqu'au centre du Pacifique. Dans le panache de l'Amazonie, l'étude de la distribution des terres rares a permis de différencier le comportement des phases particulières grossière, fine et ultrafine en eau fluviale et marine. Les signatures isotopiques du Néodyme ont montré que les particules provenant de l'érosion des roches terrestres se dissolvent en partie lors de leur contact avec l'eau de mer. Les apports d'éléments chimiques des continents vers les océans ne peuvent donc pas être évalués uniquement à partir de ce qui est transporté dans la solution. Finalement, la diminution de 50 % de la concentration des matières en suspension entre 2002 et 2012 dans les eaux côtières, sous influence du Mékong, est attribuée à la modification des apports solides du Mékong en grande partie conditionnés par les activités humaines de type construction de barrages et extraction de sédiments.

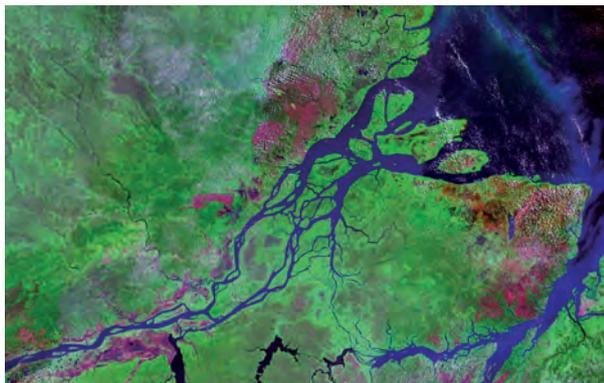


Figure 10. Images satellitaires de l'estuaire de l'Amazonie. © Creative Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/Amazon_River#/media/File:Mouths_of_amazon_geocover_1990.png)

■ Interface océan-atmosphère-cryosphère

Des travaux ont montré que les anomalies interannuelles de la banquise arctique hivernale dans le secteur atlantique étaient fortement corrélées avec les variations de l'eau atlantique en amont. Cette corrélation est due à la réémergence des anomalies de température hivernales de l'eau atlantique et se trouve renforcée par un mécanisme de rétroaction sur la circulation atmosphérique de surface qui impacte le bord de glace. Par ailleurs, durant leur long périple de 1 500 km jusqu'au pôle Nord, les vagues longues issues des tempêtes des 8 et 9 février 2007 ont progressé tout droit sous la banquise, en s'atténuant mais sans perdre de leur longueur. Cette atténuation des vagues longues était due à un phénomène de fluage de la banquise.

En Antarctique de l'Est, l'usage de « proxy » marins a mis en évidence des cycles pluridécennaux de vêlage du glacier du Mertz qui sont en cohérence avec le couplage fort entre la géométrie des glaciers et l'étendue des polynies côtières où se forment les eaux denses du plateau antarctique.

Étendre les recherches sur les méthodes numériques

Depuis la dernière prospective Océan Atmosphère, l'action MANU a été créée au sein du programme LEFE. C'est une action transverse, focalisée sur les méthodes mathématiques et numériques pour l'étude de l'océan et de l'atmosphère. Ces méthodes ont permis des avancées scientifiques remarquables et l'amélioration des prévisions numériques dans de nombreux domaines. MANU a favorisé des projets en modélisation, assimilation de données, quantification des incertitudes et encouragé la diffusion des méthodes. Dans le domaine de la modélisation, les études ont porté sur l'amélioration de la formulation mathématique de modèles et leur implémentation numérique (déferlement des vagues, interactions 3D vagues-courants, modélisation diphasique de la dynamique sédimentaire, rôle de « l'approximation traditionnelle » dans les modèles océaniques et atmosphériques, modèle simplifié de couche limite atmosphérique) ainsi que sur le développement de nouveaux schémas numériques (schémas temporels

performants, algorithmes de couplage entre systèmes d'équations hétérogènes (océan-atmosphère, océan-sédiment, Saint-Venant - Navier-Stokes...), schémas spécifiques au voisinage des côtes dans les modèles océaniques. L'usage de l'assimilation de données a été développé pour des applications très variées : dynamique de l'océan et de l'atmosphère bien sûr, mais aussi en biogéochimie marine, chimie atmosphérique, ou encore hydraulique fluviale, couverture neigeuse, transfert de pesticides, feux de forêt, dynamo terrestre. De plus, des efforts ont porté sur des aspects méthodologiques tels que les techniques d'amélioration des matrices de covariance d'erreur, la gestion d'erreurs non gaussiennes, le développement de méthodes variationnelles d'ensemble, l'assimilation de séquences d'images. Les techniques de quantification des incertitudes et d'estimation de risque ont été développées pour des contextes complexes (multivariés, instationnaires...), avec notamment des applications sur les événements extrêmes.

Chantier Mistral, Arctique et produits opérationnels en Afrique de l'Ouest

L'objectif était de contribuer à l'étude intégrée du bassin méditerranéen (Chantier Mistral), de l'Arctique (création du Chantier Arctique Français), et promouvoir les produits opérationnels développés en Afrique de l'Ouest dans la foulée du programme AMMA.

■ Mistral

MISTRALS – Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales – est un méta-programme international de recherches et d'observations interdisciplinaires et systématiques dédié à la compréhension du fonctionnement environnemental du bassin méditerranéen sous la pression du changement global pour en prédire l'évolution future. Si les premières discussions prospectives pour des études intégrées en Méditerranée avaient vu le jour lors du colloque de prospective de Lille (2005), l'ampleur du projet et les difficultés d'organisation associées n'ont réellement permis le lancement d'activités de recherche qu'à partir de 2010. Ce chantier a une dimension inter-organismes et s'inscrit dans un contexte de fortes collaborations internationales, avec des

pays européens (Italie, Espagne, Allemagne, Grèce...) ainsi qu'une large ouverture vers les pays des rives est et sud du bassin. Prévu pour une durée initiale de 10 ans sur la période 2010/2020, MISTRALS a réalisé un bilan et une prospective à mi-parcours (octobre 2015). Les textes qui suivent visent à rappeler d'une manière générale les questions scientifiques qui ont été traitées notamment pour les quatre actions qui concernent principalement la communauté Océan Atmosphère.

HyMeX a fortement contribué à structurer une communauté sur les pluies extrêmes en Méditerranée, des mécanismes à leur prévision, en intégrant l'hydrologie continentale associée et l'évaporation sur l'océan, ainsi qu'en aval, les impacts et la vulnérabilité socio-économique. Un des temps forts a été l'organisation d'une grande campagne internationale en France, Espagne et Italie avec des instruments déployés

Figure 11. Épisode de pluies intense à l'observatoire du mont Aigoual, dans les Cévennes, à 1567 mètres d'altitude.
© LSCE/OVSQ, Robert Vautard



pour décrire les trois compartiments (atmosphère-océan-hydrologie continentale). Elle a permis de progresser dans la connaissance des mécanismes de formation des systèmes précipitants, notamment ceux qui se forment sur mer et affectent le pourtour méditerranéen et qui n'avaient jamais été documentés par les campagnes atmosphériques passées. La dimension chantier a permis de rassembler une communauté multidisciplinaire (atmosphère, hydrologie continentale, océan, SHS) autour de la problématique des pluies intenses et crues rapides avec le développement de méthodes et de modèles associés pour la compréhension et la prévision. On peut par exemple mentionner le développement et l'évaluation de nouveaux systèmes de prévision d'ensemble atmosphérique pour la prévision des crues rapides, ou encore l'analyse des comportements dans les situations de pluie intenses.

MerMex est centré sur les évolutions biogéochimiques qui vont s'opérer au sein de la mer Méditerranée, du fait des changements naturels comme des impacts socio-économiques et sur la manière dont ils vont influencer sur les écosystèmes marins et la biodiversité. La mutualisation des campagnes et moyens d'observations entre HyMeX et MerMex (et MOOSE) a permis de documenter pour la première fois un cycle annuel complet de formation d'eaux denses dans le golfe du Lion (préconditionnement, convection profonde, dispersion et restratification) et fournir un jeu de données exceptionnel pour la validation et l'amélioration des modèles océaniques de mésoéchelle et de climat régional. MerMex a permis la collecte de divers ensembles de données uniques et cohérentes, alliant des données physiques, biogéochimiques et biologiques. Les principaux résultats portent sur (i) le fonctionnement du réseau trophique pélagique (des bactéries aux prédateurs planctoniques); (ii) les apports de matière organique et de contaminants (en particulier les métaux) par des sources diffuses (eaux souterraines) et ponctuelles (ports, rivières) et leurs influences sur la biogéochimie; (iii) l'influence des événements extrêmes (inondations, tempêtes) sur la redistribution des particules et de la matière dissoute au niveau de la zone côtière et vers le bassin profond; (iv) l'impact de la convection en mer ouverte sur les bilans biogéochimiques, les variations de stœchiométrie et les conditions d'apparition du bloom printanier, et l'interaction avec les plongées d'eaux denses côtières; (v) les processus majeurs (acidification, fertilisation, photo-dégradation) qui ont lieu dans la colonne d'eau et les flux d'aérosols d'origine biologique vers l'atmosphère. Dans le contexte de la modélisation, les avancées majeures concernent la représentation de la convection en mer ouverte et du couplage avec la biogéochimie, l'amélioration de la quantification des bilans biogéochimiques à l'échelle de la Méditerranée, la détermination de l'habitat de plus de 1500 espèces à travers la Méditerranée, la compréhension

de l'impact du changement climatique sur la distribution d'espèces benthiques, la modélisation du transfert de contaminants à travers la chaîne alimentaire planctonique, la compréhension de l'impact des événements extrêmes sur le bilan des contaminants à l'échelle de baies urbanisées et le couplage de modèles de bas et hauts niveaux trophiques.

ChArMEx a contribué à améliorer nos connaissances des sources d'aérosols (émissions), des processus chimiques et de la formation des aérosols organiques secondaires, des mécanismes de transport et de qualité de l'air, ainsi que les interactions aérosols-rayonnement (effet direct), les dépôts d'aérosols, les variabilités et les tendances. En particulier, ChArMEx a contribué à quantifier la contribution de la diminution des sulfates anthropiques à la fin du XX^e siècle sur le rayonnement solaire et le réchauffement à la surface dans la zone euro-méditerranéenne. Il a été démontré que la prise en compte des effets radiatifs direct et semi-direct des aérosols par un modèle couplé océan-atmosphère améliorerait les prévisions climatiques régionales. La caractérisation et la quantification des émissions atmosphériques de COV par la végétation méditerranéenne ont été améliorées. En milieu intercanopée, les rôles de la chaleur latente et de l'isoprène dans le contrôle respectif des émissions et de la réactivité chimique ont été identifiés. De même, ChArMEx a contribué à l'amélioration de la caractérisation et de la quantification (meilleure résolution spatiale et temporelle) des émissions liées aux feux de végétation en région euro-méditerranéenne, basée sur un couplage de cartes et de modélisation de la végétation et de la télédétection spatiale des feux. L'importance du mécanisme de nucléation à l'échelle du sous-bassin occidental et du rôle des composés iodés dans la formation de nouvelles particules a été mise en évidence.

PaleoMeX est consacré à l'étude du changement climatique de l'aire méditerranéenne au cours de la période holocène. De façon générale, il s'agit d'appréhender les interactions entre climat, sociétés et civilisations du monde méditerranéen au cours de cette période. Sur la période 2010-2015, PaleoMeX a acquis des séries paléoclimatiques à haute résolution temporelle pour résoudre l'échelle décennale dans des sédiments marins sur le bassin nord-occidental de la Méditerranée. Un jeu d'enregistrements continentaux et marins unique dans cette région de la Méditerranée (golfe du Lion / sud des Alpes) en particulier sur le dernier millénaire a été obtenu pour de futures expériences de modélisation climatique à l'échelle régionale.

Des «proxys» basés sur les isotopes du bore dans les coccolithophoridés et les coraux profonds en Méditerranée ont été développés pour estimer l'évolution du pH des eaux de surface et profondes induite par la pénétration du CO₂ grâce

à la mesure. Une méthodologie pour reconstruire la fréquence des paléo-tempêtes à partir des sédiments de plusieurs lagunes en Méditerranée occidentale, à l'interface océan-continent-atmosphère a aussi développé.

■ Arctique

Le Chantier Arctique Français (CAF) a été créé afin :

- de stimuler le lancement d'initiatives de recherche fortement transdisciplinaires justifiées par la nature des questions scientifiques (des sciences de l'Univers aux sciences humaines et sociales) ;
- de créer une communauté de chercheurs qui ont en commun de mener des activités de recherche en Arctique ;
- de rendre visible la recherche française en Arctique pour favoriser les collaborations au niveau international.

Le colloque de prospective du CAF (juin 2013) a démontré qu'il existe une communauté scientifique importante en France intéressée par l'Arctique. 6 priorités ont été dégagées (voir chapitre prospective). Deux projets sont en cours : PARCS (Pollution in the ARctic System) et Green Edge (Productivité biologique dans l'océan Arctique : réponse passée, présente et future aux fluctuations climatiques, et impacts sur les flux de carbone, le réseau trophique et les communautés humaines locales).

■ Promouvoir les produits opérationnels en Afrique de l'Ouest

L'action principale développée dans ce cadre a été la mise en place de la plateforme MISVA (*Monitoring of the IntraSeasonal Variability over Africa*. <http://misva.sedoo.fr/>). En été, elle a pour but de suivre et de prévoir la variabilité intrasaisonnière de la mousson et au printemps, elle constitue un système d'alerte précoce sur les vagues de chaleur. De plus, un guide pour les prévisionnistes a été rédigé : *West African Forecaster's Handbook* (publication par Wiley le 9 janvier 2017). Chacun des 11 chapitres inclut une synthèse des connaissances suite au programme AMMA-1 et un exposé des méthodes de prévision avec des illustrations. La communauté AMMA-France et Météo-France se sont mobilisés pour traduire cet ouvrage (action encore en cours) pour répondre à la forte demande des pays ouest-africains à majorité francophone. Météo-France a assuré le traitement des cas d'étude (6 actuellement) et développé un site internet bilingue constituant un outil interactif de formation et d'échanges.

Autres questions scientifiques abordées depuis 2011

■ Études de processus climatiques

• Échelles de temps très longues : centaines de millions d'années

Des études ont concerné les mécanismes intervenant dans les changements climatiques à diverses échelles de temps. Des études de modélisation ont par exemple exploré la réponse de la Terre à des variations du rayonnement solaire sur des échelles de temps de plusieurs centaines de millions d'années. Une étude a ainsi montré que la Terre a pu éviter une glaciation globale durant les 2 premiers milliards d'années du système solaire grâce à la diminution de la couverture nuageuse au-dessus des océans tropicaux et le maintien d'une bande

d'océan non gelé à l'équateur. D'autre part, une nouvelle étude de la réponse de la Terre à l'augmentation naturellement croissante du soleil à l'aide d'un modèle tridimensionnel a montré que la Terre perdra ses océans dans près d'un milliard d'années, plutôt que dans 150 Ma, comme estimé précédemment.

• Échelles de temps millénaires

De nombreuses études basées sur des mesures réalisées dans des archives sédimentaires et glaciaires ont concerné la dynamique du système climatique au cours des dernières dizaines de milliers d'années. De nouvelles mesures et datations ont notamment confirmé que les vitesses de remontée du niveau de la mer ont été beaucoup plus importantes au



Figure 12. À Talos Dôme en 2005-2006, découpe d'une carotte de glace avant de l'emballer. © LGGE (CNRS / UJF)

cours de la dernière déglaciation qu'à l'actuelle (ayant atteint plus de 4 cm/an entre 14.65 et 14.3 ka BP (*before present*), contre 3 mm/an actuellement). Par ailleurs, une succession d'effondrements de la calotte fennoscandienne a été mise en évidence au cours de la dernière déglaciation tous les 400 ans entre 17 et 15.5 ka BP, les apports massifs d'eau de fonte associés à ces effondrements ayant engendré l'élévation de 100 m du niveau de la mer Noire en 1500 ans. Une étude a également montré que la température en Antarctique et le CO₂ ont augmenté simultanément par le passé, contrairement à des travaux précédents qui avaient indiqué un retard de la hausse du CO₂ par rapport à celle de la température.

D'autre part, une étude suggère que le découplage entre la température du golfe de Gascogne (restée chaude) et celle du continent européen (très froide) lors des périodes de refroidissements intenses qui ont eu lieu lors de l'entrée en glaciation expliquerait la formation de la calotte polaire de l'hémisphère nord entre 80 et 70 ka BP. Par ailleurs, l'analyse d'archives sédimentaires littorales provenant de sept pays d'Europe du Nord a montré que l'augmentation de l'activité des tempêtes en Europe coïncidait avec les épisodes froids de l'holocène, selon un cycle d'environ 1500 ans.

• Échelles de temps courtes : décennales

D'autres études ont concerné les échelles de temps courtes, et notamment ENSO. L'analyse d'une simulation de 1200 ans d'un modèle climatique a permis de démontrer l'existence de deux régimes de variabilité associés à ENSO, dont les événements El Niño du Pacifique central et ceux du Pacifique est sont l'expression des phases chaudes. Une autre étude a montré qu'aux échelles interannuelles, les variations du

niveau de la mer sont dues essentiellement à des échanges d'eau liquide avec les continents, ces échanges se traduisant durant El Niño 1997/1998 par une augmentation de la masse océanique.

■ Biogéochimie, réseaux trophiques et diversité

Couplage hydrodynamique, biogéochimie-biologie.

En raison de la turbulence des courants, la biodiversité marine varie sur des échelles de temps et d'espace beaucoup plus petites que la biodiversité des écosystèmes terrestres. Des études basées sur l'analyse de données satellite et d'autres sur la modélisation ont révélé que le paysage de la biodiversité phytoplanctonique est organisé par les tourbillons et les fronts. La biodiversité phytoplanctonique varie donc sur des échelles de temps (1-30 jours) et d'espace (10-100 km) beaucoup plus petites que la biodiversité des écosystèmes terrestres. Ce résultat souligne d'une part le défi que représente pour ce type d'étude l'extrapolation d'observations *in situ*, souvent très sporadiques, et d'autre part le potentiel des observations spatiales, qui offrent une vision à la fois synoptique et à haute résolution. Sans approcher la très haute résolution accessible à la modélisation et aux observations spatiales évoquées ci-dessus, des études *in situ* conduites dans une mosaïque d'efflorescences phytoplanctonique dans l'océan Austral ont permis de produire une des premières preuves d'un lien entre la biodiversité des communautés de microorganismes et l'intensité des flux biogéochimiques associés. Dans des écosystèmes encore peu connus comme ceux liés à la glace de mer, le lien entre le cycle du carbone et le développement des communautés microbiennes a été développé.

Instrumentation : développements, observations, production de données de référence

De nombreuses avancées techniques ont été réalisées ces 5 dernières années en rapport avec l'instrumentation. Elles ont permis de mettre à disposition de nouvelles mesures qui peuvent être obtenues dans l'objectif de créer une base de données de référence ou qui peuvent tout simplement apporter de nouvelles informations dans des sites encore peu exploités et améliorer notre connaissance des processus fondamentaux.

■ Mise en place d'instrumentation et d'observations sur des sites d'études sur le moyen et long-terme et création de données de références

En dehors des observations réalisées dans le cadre de services labélisés, des projets ont mis en place des réseaux de mesures pour répondre à des questions particulières sur des thématiques très variées. C'est le cas par exemple des mesures de vapeur d'eau par GPS qui se sont développées en Afrique. On note aussi le développement des mesures de dépôts atmosphériques dans des sites encore très peu explorés comme dans l'océan Austral où des mesures de dépôt de mercure ont permis de mieux comprendre le cycle de cet élément, ou comme dans les Andes boliviennes où la plateforme de Chacaltaya qui culmine à 5300m d'altitude a été instrumentée sous l'égide du programme GAW. Les premiers résultats publiés montrent une contribution significative d'émissions anthropiques aux concentrations du CO₂, corrélée avec la suie.

Les nouvelles observations apparues ces dernières années utilisent dans certains cas de nouvelles instrumentations mises sur le marché permettant d'accéder à des données à fort potentiel mais inaccessibles auparavant. C'est le cas par exemple pour le développement des nouvelles observations des isotopes de l'eau basées sur la technique CRDS (*Cavity Ring Down Spectroscopy*). Ces données isotopiques permettent d'aborder des questions de dynamique atmosphérique sous un angle nouveau avec à la clé des informations complémentaires sur des processus tels que la convection ou l'origine de l'humidité dans les régions polaires. Ces données permettent aussi de tester l'origine des biais humides dans les modèles de climat.

Des données de références ont aussi été produites dans le domaine des climats passés. Dans le cadre du projet international NEEM, la reconstitution du climat de l'Eemien (épisode chaud du passé) grâce au forage des glaces les plus anciennes du Groenland a fourni des données de référence qui seront confrontées aux simulations du climat et de l'évolution des calottes.

■ Développement de nouvelles techniques d'observation

Le besoin d'observations nouvelles a poussé plusieurs équipes à développer et à tester de nouvelles techniques dans les domaines aussi variés que la chimie atmosphérique, l'océanographie opérationnelle, la calibration des "proxies".

Dans le domaine atmosphérique, on note l'intercomparaison de techniques scintillométriques ou l'utilisation de nouvelles radiosondes à très haute résolution.

Dans le domaine de l'océanographie opérationnelle, LEFE/GMMC a accompagné l'évolution des flotteurs profileurs Argo dans l'extension de leur capacité d'observation, jusque-là limitée aux variables physiques de température et salinité et à certaines variables biogéochimiques. Son soutien aux équipes développant les flotteurs Bio-Argo et Argo-O₂ aura entre autres permis de définir les protocoles pour la mesure, le contrôle de qualité et l'interfaçage avec la modélisation des données biogéochimiques issues de plateformes autonomes (flotteurs profileurs et gliders), facilitant ainsi l'utilisation de ces types de flotteurs par la communauté. Le GMMC s'est également intéressé à certains projets instrumentaux novateurs liés à l'évolution future des plateformes autonomes. Il a ainsi soutenu des développements visant à équiper les flotteurs profileurs de sondes permettant des mesures de micro-turbulence, il a également encouragé le développement de l'ASFAR, un prototype d'un système autonome de déploiement de flotteurs



Figure 13. Déploiement d'un flotteur BGC Argo. © O. Penkerch

profileurs de type Argo. Le GMMC a également apporté son soutien au développement de méthodes de restitution de la salinité de surface à partir des mesures spatiales de la mission SMOS.

Dans le domaine de la chimie atmosphérique, la spectroscopie moléculaire s'est engagée tant du point de vue expérimental que théorique dans la quantification d'espèces d'intérêt atmosphérique, avec le double intérêt d'une meilleure connaissance du bilan radiatif terrestre et d'une possibilité d'améliorer leur détection atmosphérique par des instruments *in situ* ou par satellite. La surveillance de l'atmosphère par des instruments satellite plus performants en résolution spectrale nous pousse à connaître encore mieux les spectres des gaz à effet de serre, mais aussi ceux de composés réactifs tels que le formaldéhyde, l'acide nitrique, le propane et le chlorure de méthyle. Pour détecter des gaz à l'état de trace, il faut en outre développer des outils de plus en plus sensibles tels que les techniques nouvelles de CRDS (*Cavity Ring Down Spectroscopy*). La théorie est également poussée dans ses limites avec les calculs *ab initio* de nouvelles surfaces de potentiel et du moment dipolaire afin de prédire les états excités de molécules telles que l'ozone et le méthane.

■ Synergie de différents types d'observations

C'est dans le cadre de projets coordonnés que la synergie d'observations a vu le jour ces dernières années.

Le projet EECLAT est un bon exemple de coordination sur la synergie instrumentale satellite et sol pour l'étude des nuages, autour de l'observation atmosphérique regroupant différents

types d'observations (nuages, aérosols, chimie) *via* l'utilisation d'observations spatiales (A-Train et Earth-Care). Les questions abordées ont concerné la distribution globale des nuages, les processus de formation et de disparition de différents phénomènes atmosphériques, la nucléation dans les nuages stratosphériques, la spéciation et la quantification des espèces d'aérosols ainsi que l'évaluation du transport chimique dans les modèles. Un certain nombre de techniques différentes ont aussi été mises à profit : méthodes d'extraction de données, de récupération, de mise à disposition d'un grand nombre de données, de nouvelles mesures au sol ou aéroportées. Toujours dans le domaine de l'étude de l'atmosphère, on note le projet PARISFOG sur l'appui de techniques complémentaires pour l'étude du brouillard.

D'autres initiatives ont exploré des mesures long terme sur la composition minéralogique des aérosols sahariens et leurs propriétés optiques dans le cadre de questions relatives au bilan radiatif.

Dans le domaine de l'océanographie opérationnelle, une synthèse de jeux de données océaniques *in situ* existants, obtenus dans le cadre des Services d'Observations (SO) Argo, PIRATA et SSS, a été élaborée. Ayant une forte collaboration avec Coriolis, ces études ont contribué à l'élaboration du système d'analyse objective ISAS (*In Situ Analysis System*), commun à la recherche et l'opérationnel. Enfin, un des objectifs majeurs du GMMC est de favoriser le développement de méthodes mathématiques permettant la synthèse d'observations très diverses. Le GMMC a ainsi soutenu de nombreux projets en assimilation de données multivariées. Les réanalyses GLORYS, premières réanalyses globales réalisées à une résolution permettant la prise en compte des tourbillons de mésoéchelle, en sont un exemple.

■ Calibration des « proxys »

Un grand nombre d'études concerne la calibration de "proxys" avec pour objectif d'améliorer les reconstructions paléoclimatiques. Par exemple, le suivi de la composition isotopique et chimique des eaux d'infiltration dans les grottes françaises a permis de mieux cerner les informations contenues dans les spéléothèmes. La détermination de la distribution intramoléculaire des isotopes de l'hydrogène dans une molécule végétale par spectroscopie à résonance magnétique nucléaire en milieu anisotrope montre la possibilité de différencier des conditions climatiques, mais aussi des voies de biosynthèse empruntées par l'hydrogène depuis l'eau jusqu'à la molécule, et ouvre des perspectives.



Prospective scientifique

Les recherches menées dans le domaine Océan Atmosphère (OA) appartiennent par nature aux sciences de l'environnement. Elles sont, par conséquent, d'un grand intérêt pour la société. La prospective conduite dans le domaine OA propose de mener de front et de manière équilibrée des recherches qui renforcent les thèmes fondateurs d'OA, qui explorent de nouvelles frontières et qui contribuent à une vision intégrée du système Terre.

Renforcer les connaissances sur les thèmes fondateurs du domaine Océan Atmosphère

Le renforcement des connaissances acquises ces dernières années sur les grands thèmes fondateurs passe par l'approfondissement de notre compréhension des processus mis en œuvre dans les enveloppes fluides que sont l'atmosphère et l'océan, mais aussi par l'exploration de nouvelles voies décrivant la complexité de notre environnement. La connaissance de ces processus implique leur description d'un point de vue qualitatif mais aussi quantitatif, ainsi que leur modélisation, afin de déterminer et de documenter les échelles spatiales et temporelles qui leur sont associées, ainsi que leurs variabilité et interactions.

■ Compréhension des processus

• Processus atmosphériques

Dans l'atmosphère, les processus physiques et dynamiques les moins bien décrits se situent aux fines échelles, c'est-à-dire aux échelles inférieures à la centaine de kilomètres. Ils sont non seulement importants pour comprendre les contributions locales de la circulation atmosphérique, mais aussi à plus grande échelle en rétroagissant sur les échelles synoptique et planétaire. La couche limite atmosphérique est ainsi encore aujourd'hui la source de nombreux questionnements. Les verrous scientifiques restent liés à la complexité du terrain (montagne ou pentes faibles), au type de surface (hétérogénéité des couverts végétaux, etc.) ou aux forçages dans les zones de transitions temporelles et spatiales (zones côtières par exemple). Plus particulièrement, il est important d'étudier les processus se déroulant dans les couches limites stables. Il est nécessaire d'utiliser à la fois des observations pérennes sur sites instrumentés et des campagnes dédiées pour mieux comprendre les processus sous différents environnements et différentes conditions, afin d'enrichir leurs paramétrisations : il faut améliorer la représentation des gradients d'humidité / température / vent, les formulations générales utilisées dans les calculs de flux, et se focaliser sur la définition des variables impliquées (inertie thermique, rugosité) et la prise en compte spatiale des effets sous-maille. Enfin, mieux comprendre la dynamique de la couche limite est aussi important pour la troposphère libre en tant que lieu d'initiation de la convection atmosphérique.

La compréhension de la convection atmosphérique et de ses effets à plus grande échelle reste un enjeu majeur. Il faudra réussir à exploiter les variables 3D issues des simulations numériques sur de grands domaines afin d'améliorer les paramétrisations des modèles à plus basse résolution. Cette

exploitation permettra de mieux comprendre les processus associés au transport de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement au sein des systèmes convectifs (utilisation de traceurs), de tester les hypothèses à la base des paramétrisations (critère de déclenchement, hypothèse de fermeture) et aussi de mieux appréhender les interactions entre la convection locale et la dynamique de plus grande échelle.

La compréhension des processus turbulents doit être poursuivie, notamment dans le but d'améliorer leur modélisation dans un contexte d'augmentation de la résolution des modèles (c.-à-d. échelles kilométrique et hectométrique). En effet, à ces résolutions, les processus turbulents se situent dans une zone grise et les schémas actuellement utilisés doivent être adaptés pour obtenir une meilleure partition entre turbulences résolues et sous-maille. Les pistes d'amélioration sont nombreuses : nouvelles formulations des flux turbulents, nouvelle longueur de mélange, utilisation de variables plus conservatives, etc. La question de la représentation de la turbulence dans les nuages convectifs profonds se pose et des observations de la structure thermodynamique au sein des nuages convectifs sont nécessaires pour valider les nouveaux développements.

Les processus d'échanges troposphère-stratosphère sont encore mal connus notamment dans la région de la haute troposphère - basse troposphère tropicale (UTLS) où l'air troposphérique pénètre principalement dans la stratosphère et sert de « porte d'entrée » à de nombreuses espèces chimiques troposphériques. Le transport des différents constituants (traceurs, vapeur d'eau) dans l'UTLS tropicale dépend des interactions avec la physique (formation nuageuse, notamment des cirrus) et la dynamique atmosphériques (overshoots convectifs, turbulence, onde de gravité). Aux latitudes moyennes et polaires, la compréhension du mélange entre airs stratosphérique et troposphérique nécessite une étude approfondie des moments des foliations de tropopause.

Les processus en lien avec l'électricité atmosphérique (électrisation, décharge) dans la troposphère mais également dans la stratosphère et l'ionosphère doivent être compris, analysés et paramétrés dans les modèles. Ces décharges atmosphériques, en lien avec les phénomènes de convection (répartition des charges au sein des nuages) sont de plus à l'origine de réactions chimiques impactant les concentrations d'ozone depuis le sol jusqu'à l'ionosphère et nécessitent des études détaillées.

La baisse observée des teneurs en halocarbures, réglementés dans le cadre du protocole de Montréal, a aujourd'hui conduit à une stabilisation du niveau d'ozone stratosphérique. Si une augmentation est attendue, elle n'est pas encore observée globalement sans ambiguïté, celle-ci étant dépendante de nombreux facteurs (irradiation solaire, abondance des composés azotés, halogénés, de la vapeur d'eau et des aérosols). Ainsi, les sources variées des composés stratosphériques impliquent une caractérisation fine et un suivi fin de leur variabilité, associés à des études de modélisation de type chimie-transport ou chimie-climat. De façon générale, la variabilité des composés stratosphériques associés à l'augmentation des gaz à effet de serre affecte la température de la stratosphère. Ainsi l'évolution de la circulation de Brewer-Dobson associée à l'activité ondulatoire et ses liens avec la fréquence et l'intensité d'événements extrêmes en région polaire (trou d'ozone arctique, échauffements stratosphériques soudains (SSW), frozen-in anticyclones (FriACs)) restent un enjeu majeur.

Les composés chimiques présents dans l'atmosphère sont transformés selon des mécanismes physico-chimiques qui peuvent se dérouler en phase homogène ou de façon hétérogène entre plusieurs phases. Les inconnues restant à élucider concernent notamment les processus d'oxydation atmosphérique. Ces processus impactent à la fois le bilan radicalaire (OH, NO₃, Cl...) et la composition de la phase gazeuse, en particulier par la formation de molécules oxygénées mono- et polyfonctionnelles. Les voies hétérogènes de formation des précurseurs des radicaux (tels que HONO ou ClNO₂) ainsi que les réactions hétérogènes dans leur ensemble restent mal connues, car elles impliquent des surfaces très variées telles que la neige, les aérosols minéraux et salins, les surfaces végétales ou les surfaces urbaines couvertes de films organiques. Des sources manquantes de radicaux HOx sont toujours invoquées dans des conditions de fortes émissions de COV (composés organiques volatils) biogéniques, ainsi que des puits manquants de radicaux OH dans des masses d'air pollué transportées à longue distance, mais aussi dans certaines zones sources. Les voies d'oxydation, tant homogènes qu'hétérogènes, des COV par les radicaux doivent être encore mieux appréhendées, notamment les processus

menant en peu d'étapes à des composés très fonctionnalisés et peu volatils (réactions d'auto-oxydation).

Les processus de formation et de vieillissement des particules atmosphériques restent encore mal compris et mal modélisés, surtout en milieux urbain et marin, ce qui obère partiellement nos capacités à fournir des résultats de modélisation 3D réalistes des concentrations en particules atmosphériques et de leurs sources. Les efforts devront porter principalement sur la fraction organique des aérosols, avec d'une part des études spécifiques s'intéressant aux flux d'émissions aux sources (en champs proches) en liaison avec des caractérisations chimiques poussées des phases gazeuse et particulaire (y compris des composés de volatilité intermédiaire). D'autre part, la recherche de nouveaux mécanismes de formation de particules et de leur évolution reste un champ d'investigation d'actualité. Une attention particulière est aussi nécessaire pour bien appréhender les processus cycliques en phase hétérogène tels que ceux, photo-activés ou non, se déroulant à la surface des aérosols minéraux ou en phase liquide (brouillards, nuages ou aérosols déliquescents). L'ensemble de ces champs de recherche est fortement dynamisé aujourd'hui par l'avènement d'une instrumentation (spectrométrie de masse à haute résolution) permettant l'analyse moléculaire de l'aérosol organique ainsi que des approches innovantes, renseignant les différents types de réactivité aux interfaces.

L'estimation de l'effet radiatif direct des aérosols primaires d'origine naturelle (poussières terrigènes, sels de mer, aérosols organo-soufrés dus aux éruptions volcaniques, feux de biomasse), dont les émissions sont sensibles aux changements climatiques et à la croissance démographique, reste une priorité. Pour cela, les paramétrisations des propriétés d'absorption du rayonnement par les aérosols et de leur variation spectrale, de l'UV à l'IR, en lien avec leur composition chimique et leur variation au cours du vieillissement atmosphérique, doivent encore être améliorées.

L'étude du cycle de vie des nuages, de leurs précurseurs gazeux et particulaires, englobant aussi les processus, évolutions et modifications microphysiques associées, plus particulièrement en phase glace, reste un domaine d'une grande actualité scientifique non seulement pour la compréhension *in fine* de ces processus et des propriétés bio-physico-chimiques et microphysiques-radiatives en tant que telles, mais surtout pour son impact sur le système climatique et sa représentation dans les modèles numériques. Dans ce contexte, l'étude du cycle de vie des nuages inclut les recherches à développer sur : (1) le rôle des composés organiques dans les processus de production d'aérosols organiques secondaires et de formation des « nouvelles particules » agissant comme noyaux de condensation de nuages ; (2) le rôle des interactions entre

composés organiques secondaires et composés inorganiques, telles que la formation de complexes métaux-ligands qui peuvent modifier les propriétés hygroscopiques des particules et leur capacité à agir comme CCN; (3) la caractérisation du pouvoir glaçogène des particules atmosphériques de nature et d'origine différentes (bactéries, spores, particules terrigènes...) et l'évaluation de l'effet de chacune de ces particules sur la formation des cristaux; (4) la quantification de la réactivité chimique et de l'activité biologique en phase aqueuse sur les propriétés physico-chimiques de particules; l'étude de la réactivité chimique comprend à la fois les processus photochimiques et ceux impliquant des mécanismes de condensation à l'échelle moléculaire; l'étude de l'activité biologique en phase aqueuse pourra bénéficier des nouvelles techniques d'analyse des organismes et de leur métabolisme (analyses « omiques »); (5) les facteurs-clés gouvernant les processus microphysiques de formation de la glace et des précipitations (forme, taille, nombre) et leurs hétérogénéités spatio-temporelles.

• Processus océaniques

Dynamique de la circulation océanique. L'océan est principalement forcé à grande échelle par l'atmosphère et les marées, et ces sources d'énergie sont dissipées à fine échelle. Les reliefs topographiques sous-marins couvrent de nombreuses échelles spatiales et sont générateurs de turbulences, d'ondes et d'instabilités; ils favorisent également les interactions d'échelles menant à la dissipation d'énergie. Les chemins de l'énergie des grandes vers les petites échelles spatio-temporelles de la turbulence impliquent des transferts entre les différentes formes d'énergie, et dans l'océan stratifié la « route vers la dissipation » implique des processus dynamiques d'échelles spatio-temporelles multiples (mésoséchelle, sub-mésoséchelle, ondes internes, ondes piégées par la topographie, frottement sur le fond, vagues...). Notre connaissance de ces processus physiques, souvent actifs au sein de couches limites à la dynamique complexe, est encore partielle et de nombreuses questions restent ouvertes sur leurs rôles respectifs et leurs mécanismes d'interaction dans, par exemple, les transferts d'énergie vers les échelles dissipatives, la génération, la variabilité et l'évolution des circulations de grande échelle (stratification des couches de surfaces, courants sub-inertiels et leurs instabilités, masses d'eau), des fronts et des panaches dans les régions côtières, des structures sédimentaires en eaux profondes, sur les plateaux, et dans les régions littorales où de véritables interactions entre vagues, courants et sédiments sont en jeu. En particulier, il est important de comprendre et de pouvoir hiérarchiser les rôles respectifs de ces processus par rapport au rôle des forçages atmosphériques et du forçage par la marée.

La dynamique océanique de grande échelle montre une forte variabilité interannuelle à décennale qui se superpose au signal de réchauffement climatique et perturbe sa détection et son attribution. Or les processus qui gouvernent cette variabilité basse fréquence, intrinsèque ou forcée, sont encore mal compris pour diverses causes, liées autant au manque d'observations qu'aux difficultés des modèles à les représenter. Des questions fondamentales concernant les processus contrôlant la dynamique océanique à grande échelle et sa variabilité se posent : quels sont les mécanismes (vus comme des enchaînements et interactions de processus d'échelles multiples) par lesquels l'océan va privilégier les structures spatiales et temporelles de ces variations aux basses fréquences, qu'elles soient forcées par l'atmosphère ou intrinsèques? Comment et par quels mécanismes l'océan redistribue-t-il les effets du changement climatique (c.-à-d. les changements de contenu thermique et de CO₂) vers les profondeurs et entre les grandes régions de l'océan? Quel rôle particulier joue la dynamique des grands carrefours océaniques (courants de bord ouest, thermocline, seuils topographiques, zones inter-gyres...) dans ces mécanismes? Le manque de connaissances sur ces questions est un verrou pour la compréhension des variations et changements climatiques et la quantification du bilan énergétique de l'océan.

Le fonctionnement de la pompe biologique de carbone et des processus associés. Les processus biogéochimiques qui contribuent à transférer du dioxyde de carbone atmosphérique depuis l'océan de surface vers l'océan profond et les sédiments jouent un rôle clé dans le cycle global du carbone. Ce service écosystémique qu'on appelle « la pompe biologique de carbone » met en jeu différents types de processus comme la photosynthèse dans l'océan éclairé qui transforme le CO₂ dissous en carbone organique particulaire (COP), l'export de ce COP hors de la couche mélangée, son transfert et sa dégradation le long de la colonne d'eau dans l'océan intermédiaire et profond jusqu'à son stockage ou sa séquestration dans les sédiments. Différents verrous doivent être levés tant au niveau de l'identification, de la description et de la quantification des processus que de leur variabilité pour mieux comprendre et modéliser la pompe biologique de carbone.

- Quel est le contrôle exercé par les nutriments et la qualité de la matière organique sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes? Quelles sont les conséquences de la reminéralisation de la matière organique sur la régénération des différents nutritifs et traceurs? Dans ce contexte, une meilleure connaissance des processus qui déterminent la biodisponibilité et le devenir des nutriments et de la matière organique dans l'océan est primordiale. Ceci implique d'approfondir les connaissances sur les mécanismes de

colimitation, les processus de spéciation pour la surface, la qualité de la matière organique pour la zone non éclairée des océans ainsi que le lien entre la biodiversité et la biodisponibilité des éléments majeurs et traces.

- Quels sont les processus et les facteurs de contrôle des interactions entre les phases dissoutes et les particules organiques et inorganiques (minérales), et quel est le rôle des microorganismes associés à ces particules dans la colonne d'eau ? Ceci implique d'approfondir les connaissances sur les mécanismes biologiques et physiques (agrégation, vitesse de chute) de formation des particules et de leur transformation et dégradation ultérieure. Le fractionnement isotopique, l'usage de nouveaux traceurs, la connaissance des communautés biologiques (leur diversité mais aussi leurs fonctions) associées aux particules sont des pistes à explorer. Les connaissances acquises permettront aussi une meilleure calibration des « paléo-proxys » destinés à la reconstitution de la variabilité passée des processus biogéochimiques tels que la production primaire et l'exportation du matériel organique néoformé à la surface des océans.

- Quels facteurs physiques, chimiques et biologiques influencent les deux métriques principales (l'efficacité d'export et l'efficacité de transfert du carbone) caractérisant les différents types d'export et de transfert de carbone organique dans l'ensemble des compartiments de la colonne d'eau (zones mésopélagiques, bathypélagiques et sédimentaires) ?

- Quels contrôles exercent les facteurs écologiques tels que la composition et la structure de l'écosystème sur le fonctionnement de la pompe biologique ? La connaissance de la biodiversité au sein des grands groupes fonctionnels est actuellement un verrou empêchant toute prévision à moyen-long terme de l'évolution des cycles biogéochimiques (y compris la séquestration de C par la pompe biologique). La biogéochimie doit maintenant inclure la biologie de façon explicite en particulier sous l'angle de la biodiversité fonctionnelle (contrôle des fonctions majeures des cycles biogéochimiques – production, minéralisation, transport – par la structure des communautés sur l'ensemble des continus trophiques). Quelles sont la résistance et la résilience des écosystèmes, des communautés et de leurs fonctions dans un contexte climatique changeant et face aux événements extrêmes ?

Les différents questionnements scientifiques posés ci-dessus autour de la pompe biologique de carbone fédèrent la communauté internationale autour de projets intégrés. La France devra être présente dans cet effort en pilotant des projets de grande ampleur alliant les nouveaux moyens d'investigation et de modélisation.

• Interactions d'échelles et couplage

Les dynamiques étudiées dans les domaines OA sont complexes. Elles ont souvent un caractère non linéaire marqué, à l'origine de fortes interactions d'échelles, et peuvent comporter une dimension stochastique. Les processus aux grandes échelles sont donc indissociables de ceux aux fines échelles. Ceci amène à préconiser un certain nombre d'axes de travail assez fondamentaux :

- encourager les développements théoriques et les nouvelles approches de modélisation et d'analyse pertinents pour prendre en compte ces caractères non linéaires, multi-échelles et stochastiques (par exemple simulations d'ensemble, paramétrisations stochastiques...);
- chercher à mieux comprendre et caractériser les extrêmes (risques naturels, incluant les inondations, tempêtes, cyclones, tsunamis, etc.);
- développer les mesures à haute résolution, pour disposer de bases de données couvrant une large gamme d'échelles.

D'une façon générale, la notion de continuum d'échelles est de plus en plus présente, à la fois dans les observations et dans les modèles. La tendance à couvrir un large spectre rend les segmentations spatiales (global – régional – local) et temporelles de moins en moins nettes. Inversement, les mêmes observations ou les mêmes modèles peuvent permettre d'étudier des problèmes d'échelles différentes.

Dans l'océan. Les chemins de l'énergie des grandes vers les petites échelles spatio-temporelles de la turbulence où la dissipation se produit impliquent des transferts entre les différentes formes d'énergie (cinétique, potentielle, thermique), transferts qui impliquent eux-mêmes des interactions fortes entre des processus dynamiques d'échelles spatio-temporelles multiples. Par ailleurs, l'importance des tourbillons océaniques de mésoéchelle sur les modes de variabilité climatiques lents est maintenant affirmée, mais les mécanismes d'interaction d'échelles mis en jeu ne sont pas encore compris. De plus, des zones spatialement très confinées de l'océan mondial, mal prises en compte par les modèles de grande échelle, jouent un rôle majeur dans le climat à divers titres (polynies côtières pour la formation d'eau dense ; systèmes d'upwelling de bord est, etc.). Il s'agit donc de comprendre comment les interactions d'échelles liées à la mésoéchelle et à la sub-mésoéchelle océaniques affectent les grandes échelles au travers d'échanges énergétiques (et notamment les flux verticaux à fine échelle) et d'évaluer leur impact sur la stratification des couches de surface, les processus dissipatifs, le transport, la dispersion et le piégeage des matières et des éléments dans les couches de fond, les flux biologiques et biogéochimiques, et les flux de carbone avec l'atmosphère.

Renforcer les connaissances sur les thèmes fondateurs du domaine Océan Atmosphère

La prise en compte de la marée dans les modèles globaux de circulation générale océanique est un enjeu important pour la prévision opérationnelle, car elle a une forte influence sur les courants de surface et leur variabilité haute fréquence ainsi que sur le mélange vertical (et donc la stratification), en particulier sur les plateaux et talus continentaux. Associée aux surcotes des ondes de tempête, elle constitue un paramètre majeur pour l'alerte et la gestion des risques en zone côtière. Sa modélisation précise est devenue un enjeu important pour l'exploitation des futures missions d'observation de la topographie de l'océan (mission spatiale SWOT). Elle soulève également de nombreuses questions scientifiques, en particulier les mécanismes de dissipation des ondes internes et leurs paramétrisations dans les modèles. Différentes approches méthodologiques (modélisation directe de la marée, couplage « faible » entre modèle de circulation générale et modèle de marée, paramétrisation des effets de mélange liés à la marée interne) sont possibles et leurs pertinences seront à évaluer.

Dans l'atmosphère. L'importance de la microphysique des nuages et des processus humides à fine échelle sur la dynamique atmosphérique à l'échelle planétaire est également un sujet d'actualité dont l'un des enjeux est l'amélioration des prévisions météorologiques à courte et moyenne échéance. Par exemple, la représentation des blocages atmosphériques est fortement dépendante de la résolution des modèles et de processus à fines échelles d'interaction avec la topographie et les fronts océaniques. À l'inverse, les phénomènes atmosphériques à mésoéchelle, comme les événements fortement précipitants, dépendent des structures de la circulation atmosphérique aux échelles synoptiques. Les conditions de forçage synoptique favorisant ces événements doivent être mieux connues.

Pour la chimie et la pollution, dans le passé, des couplages d'échelles ont été effectués par le biais de la modélisation numérique allant de l'échelle globale à l'échelle urbaine, voire à l'échelle de la rue. Aujourd'hui, les avancées sur la modélisation de type Large Eddy Simulation en site réaliste et complexe ouvrent des perspectives de recherches ambitieuses sur l'étude des interactions entre qualité de l'air et météorologie urbaine. *In fine*, l'enjeu pour le futur consiste à étendre la descente des échelles jusqu'à la prise en compte de l'exposition de l'individu, ce qui nécessite de caractériser l'air ambiant à de très fines échelles, et dans des milieux très variés, y compris à l'intérieur des bâtis.

En ce qui concerne le climat, il faut renforcer les études permettant de mieux comprendre les différentes facettes de la variabilité climatique avec des approches événementielles, et l'étude des liens entre variabilité et changement d'état moyen. Ces travaux doivent intégrer climat actuel, climats passés (où

de nombreuses données retracent les événements) et climat futur (pour se donner les moyens de vérifier que ce que l'on projette est bien fondé).

En raison du nombre et de la variété des interactions entre les processus et entre les échelles, le passage de l'étude des processus à celle du système climatique complet représente un travail considérable nécessitant lui aussi des développements méthodologiques spécifiques. Ces nouvelles méthodologies ont un impact sur les outils à développer et à pérenniser, mais aussi sur la manière dont la communauté s'organise. Elles sont nécessaires à la poursuite des études sur l'estimation de la sensibilité climatique et de son incertitude, les projections climatiques et la prévision décennale qui sont autant d'objectifs affichés de la modélisation climatique.

En particulier, il faut décroiser les notions de climat régional versus climat global, et développer les approches permettant de mieux relier grandes échelles et échelles régionales : d'un point de vue de descente d'échelle bien sûr, mais également de compréhension des caractéristiques climatiques régionales en termes de téléconnexions, de processus, de complexité à prendre en compte pour étudier le changement du climat, les liens climat-environnement, etc.

Les synergies processus-variabilité. La variabilité des phénomènes atmosphériques ou océaniques provient de mécanismes faisant intervenir de multiples processus. Améliorer la compréhension de cette variabilité passe alors souvent par des approches simplifiées et il est nécessaire de favoriser et amplifier l'utilisation de modèles à complexité intermédiaire ou de versions simplifiées de modèles réalistes (p. ex., versions aquaplanètes de modèles contenant toute la physique, ou modèles de circulation générale contenant des physiques simplifiées). Les résultats obtenus sont ensuite validés par confrontation aux observations ou aux résultats de simulations complexes. Les exercices CMIP fournissent un certain nombre de simulations de ce type qui semblent être encore sous-exploitées. Les modèles simplifiés peuvent de plus permettre d'accéder à des échelles de temps plus longues (> siècle), typiques des études paléoclimatiques. Il semble nécessaire d'inciter des projets proposant conjointement des études d'événements particuliers se focalisant sur certains processus et des études sur la variabilité climatique. La capacité de stockage augmentant de jour en jour, il devient de plus en plus possible d'appliquer des diagnostics issus d'études de processus à courte échéance sur des simulations longues de climat, car les sorties journalières de multiples variables sont de plus en plus courantes. Enfin, les campagnes de mesures dédiées à l'étude de certains processus sont l'occasion d'évaluer leur représentation dans les modèles de circulation générale, d'estimer leur impact sur les biais des

modèles notamment en matière de variabilité spatio-temporelle des phénomènes. Cet effort de synergie processus-variabilité nécessite une collaboration étroite entre spécialistes travaillant sur des échelles de temps très diverses (p. ex. météorologues et climatologues) et utilisant différentes approches : théoriciens, spécialistes des observations, expérimentateurs, modélisateurs.

■ Étude de la variabilité temporelle et spatiale des phénomènes

Méso- et sub-mésoéchelle dans l'océan. La circulation océanique dépend largement des petites échelles : les tourbillons et méandres de mésoéchelle (10 à 100 km) et les courants de bord le long des pentes continentales contribuent substantiellement aux transports de chaleur et d'eau douce entre les latitudes subtropicales et subpolaires. Dans l'océan superficiel, les filaments et les tourbillons cohérents de sub-mésoéchelle (1-10 km) sont le lieu d'échanges verticaux particulièrement intenses, causant des flux (énergie, biogéochimie) à haute fréquence dont les rétroactions sur la grande échelle (> 1000 km) sont encore largement méconnues. La turbulence océanique de sub-mésoéchelle est encore mal connue, car elle n'est pas observée de façon systématique ni représentée explicitement de façon réaliste et routinière dans les modèles de circulation océanique. Pourtant, un faisceau d'indices s'appuyant d'une part sur des résultats de simulations numériques idéalisées à très haute résolution, et d'autre part sur des observations issues de gliders, d'éléphants de mer ou de la sismique dans la colonne d'eau, suggèrent que ces fines échelles océaniques sont omniprésentes dans l'océan (du large aux mers régionales et côtières), et qu'elles exercent un contrôle actif sur certaines des propriétés essentielles de l'océan (biologie et biogéochimie marine, dispersion 3D de traceurs et polluants). Il s'agit donc d'entreprendre des études visant à comprendre comment les processus de méso et sub-mésoéchelle océanique affectent les grandes échelles au travers d'échanges énergétiques (et notamment les flux verticaux à fine échelle), et à quantifier leurs impacts sur la stratification, sur les flux verticaux de carbone et de nutriments, qui sont des facteurs clés dans le changement climatique.

Plus spécifiquement, les questions suivantes devront être traitées : Quels sont les mécanismes et les instabilités qui régissent la sub-mésoéchelle ? Comment et dans quelle mesure cette dynamique de fine échelle contribue-t-elle à la stratification des couches superficielles ? Quel est le rôle de ces fines échelles dans les échanges verticaux d'énergie et de matière entre l'atmosphère et les couches profondes de l'océan, et dans quelle mesure cela affecte-t-il la dissipation et

le bilan énergétique de l'océan ? Quelle est l'importance de ces interactions d'échelles dans la dynamique des couches de fond pour la quantification des processus dissipatifs, le transport et la dispersion des matières et des éléments, la fermeture des bilans d'énergie ? Quels mécanismes régissent les transferts d'énergie entre sub-méso, méso et grande échelle ? Quelles voies vers la paramétrisation des effets des fines échelles de la turbulence ? Quel impact de la variabilité de la petite échelle vers la grande échelle ?

Les ondes internes et la turbulence méso et sub-mésoéchelle contribuent de manière similaire aux variations du niveau de la mer dans la gamme des moyennes et petites échelles (<100km). Comment séparer les contributions respectives de ces processus pour pouvoir diagnostiquer proprement la dynamique océanique à partir des données spatiales ? Les structures dynamiques de (sub-)mésoéchelle sont-elles favorables à des niches écologiques, et plus généralement quelle influence a la dynamique de fine échelle sur la biodiversité ?

Dans ce contexte, il est recommandé de proposer des études plus intégrées, couplant l'étude des cycles biogéochimiques et de la biologie avec l'étude des processus physiques à (sub-) mésoéchelle.

La variabilité intrasaisonnière. Dans les tropiques, l'Oscillation de Madden-Julian (MJO) et plus généralement les variations intrasaisonnières de la convection tropicale restent encore mal comprises et sont mal représentées dans les modèles de circulation générale. C'est d'autant plus dommageable que ces variations intrasaisonnières tropicales ont un effet sur la variabilité de la circulation de grande échelle des moyennes latitudes comme l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) *via* la propagation des ondes de Rossby quasi stationnaires. Ainsi, une meilleure compréhension de ces processus intrasaisonniers permettrait d'améliorer leur représentation dans les modèles et les prévisions à moyenne échéance des grands modes de variabilité du temps à différentes latitudes.

La variabilité climatique. Les interactions d'échelles spatiales précédemment mentionnées sont au cœur des mécanismes de la variabilité climatique qui s'étend sur des échelles de temps très différentes. Certains modes de variabilité du climat actuel fluctuent aux échelles interannuelles (ENSO) ou multi-décennales (AMO, PDO) et d'autres à des échelles de temps diverses, comme la NAO qui varie sur des échelles de temps intrasaisonnières, interannuelles et multi-décennales. Par ailleurs, la variabilité climatique centennale, millénaire et orbitale enregistrée dans les archives climatiques met en lumière le fort caractère potentiellement non linéaire du système climatique.

Outre la compréhension des mécanismes sous-jacents, mieux décrire et prévoir la variabilité, c'est aussi pouvoir faire des études plus précises d'attribution des impacts du changement climatique.

Au-delà de ce qui se fait déjà avec succès dans la communauté, différentes pistes sont identifiées pour rendre possible des progrès majeurs dans la compréhension et la prévision de la variabilité climatique :

- Revoir la définition et l'analyse des modes de variabilité du point de vue des aspects de non-stationnarité et de multiplicité des échelles concernées ; promouvoir des synergies entre études de processus et modes de variabilité ; échantillonner les modes de variabilité sur plusieurs fenêtres spatiales et temporelles (p. ex. étude d'ENSO dans le passé, présent et futur) ;
- Mieux comprendre les interactions d'échelles et leur lien avec les grands modes de variabilité ; étudier les phénomènes d'interférence et de synchronisation ;
- Étudier les changements abrupts (tipping points), notamment en ce qui concerne la dynamique de ces événements (par exemple la vitesse et l'accélération des changements) dans le passé, le présent et le futur. Des éléments fortement impliqués, voire à l'origine même, du comportement non linéaire du système climatique et de l'existence de bifurcations sont par exemple la banquise arctique, le cycle hydrologique, la circulation méridienne atlantique (AMOC), ou le couplage entre la circulation océanique et les calottes de glace ;
- Mieux prendre en compte la variabilité interne/intrinsèque du système climatique pour les études d'attribution des changements en termes de mécanismes et de causes physiques et aller au-delà d'une simple approche statistique (p. ex. pour le FAR – Fraction Attributable Risk) ;
- Poursuivre les études sur les changements hydrologiques en combinant des indicateurs terrestres et océaniques (continuum terre-mer) ;
- Encourager les études sur les couplages physique-biologie-biogéochimie : réaliser des travaux à l'interface avec la biologie pour l'étude des réponses et de l'adaptation des écosystèmes. Prendre en compte la capacité d'adaptation des organismes dans les simulations numériques passées et futures.
- Développer de nouvelles stratégies pour améliorer les modèles. Mieux développer l'articulation entre les différents types de modèles, cibler des échelles de temps avec différents types de modèles. Combiner simulations numériques et observations paléoclimatiques pour identifier où sont les biais et quelles rétroactions manquent éventuellement dans les modèles.

Articulation paléo/actuel/futur

La stratégie d'amélioration des modèles utilisant la dimension paléo peut être appliquée à différentes périodes de temps :

(i) les derniers millénaires, avec l'avantage de permettre de prolonger les séries instrumentales, (ii) la dernière période glaciaire (10-100 000 ans), qui comporte des exemples de transitions climatiques abruptes relativement bien datées ; (iii) des périodes de temps plus lointaines (0.1-1.5 million d'années) qui permettent d'étudier les liens entre les changements du cycle du carbone et la circulation océanique sur les longues périodes de temps et durant certains interglaciaires qui sont des « analogues » au climat actuel. L'approche intégrée modèles-données permet d'explorer le rôle des forçages (orbital, volcanisme, gaz à effet de serre) sur la variabilité basse fréquence du climat. Les travaux sur les variations climatiques des derniers millénaires (intensité, variabilité, événements extrêmes) et leurs causes, particulièrement aux hautes latitudes, devraient permettre de déterminer dans quelle mesure les changements observés au cours de l'Anthropocène sortent de la variabilité interne du climat. Une question qui reste encore en suspens est de savoir quand l'état naturel a été rompu (début de la déforestation, période romaine, ère industrielle), et de préciser la notion de temps d'émergence du signal anthropique.

L'étude de ces questions en utilisant de manière conjointe modèles et données permettra non seulement d'apporter des réponses aux nombreuses questions toujours en suspens, mais aussi de mieux évaluer l'amplitude potentielle des changements à venir. Enfin, la collaboration entre communautés paléo et climat actuel doit fructifier notamment en gardant en mémoire l'importance des liens entre variabilité et changement d'état moyen.

■ L'approche intégrée processus-variabilité en réponse aux enjeux sociétaux

Le climat. Au-delà des grands modes de variabilité liés à l'orbite de la Terre autour du soleil, le système reste largement incompris sur le plan des évolutions non linéaires internes (résonances et effets de seuils dans la dynamique du système) ainsi que des événements internes (activité volcanique, influence anthropique). La connaissance fondamentale de la dynamique climatique actuelle reste donc, au-delà de la question du réchauffement global, sous l'influence principale des activités humaines, un grand champ d'investigation pour la recherche. Les résultats de ces recherches permettent d'accroître la fiabilité globale et locale des prévisions et projections modélisées d'évolution du climat moyen sur les décennies et siècles à venir (échelles de temps très courtes au regard de l'évolution naturelle du climat, mais contraintes par l'accroissement rapide de l'influence humaine).

L'étude de la variabilité climatique et des changements climatiques : si les modèles actuels ont permis d'établir que le réchauffement global récent est avant tout dû aux activités humaines, ils ne permettent pas encore d'estimer avec confiance les changements climatiques régionaux associés à ce réchauffement, en particulier pour certaines variables (p. ex. les précipitations). En outre, des incertitudes demeurent sur l'amplitude du réchauffement et de son effet sur de nombreux paramètres, par exemple le volume des glaces ou le niveau de la mer.

C'est aussi le cas pour les événements extrêmes ou les variations rapides. Un défi est donc de développer de nouvelles approches pour définir et caractériser les événements extrêmes pour chacune des approches (vision statistique ou vision basée sur la vulnérabilité). Il faut aussi mieux identifier la façon d'intégrer les événements extrêmes dans la variabilité du climat moyen (dans un climat en évolution).

L'utilisation directe des résultats de modèles lorsqu'ils ne sont pas contraints par les observations (assimilation par exemple) est souvent difficile et limitée du fait des erreurs des modèles. Ces erreurs peuvent avoir des conséquences importantes sur la simulation des changements climatiques. Au-delà de nos thématiques propres, l'émergence des « services climatiques » et la déclinaison des questions climatiques dans de nombreuses disciplines induisent un niveau d'exigence de plus en plus fort du point de vue de la qualité des résultats et leur interprétation, et ce pour des situations de plus en plus variées. Tout ceci nécessite des travaux importants, aussi bien en termes de développement de modèles, que d'évaluation et de compréhension.

En plus des éléments décrits dans la section 1.2, les deux pistes suivantes sont à privilégier pour améliorer la fiabilité des modèles climatiques et donc des projections climatiques :

- Poursuivre le travail sur la détermination de la sensibilité climatique (température, précipitations) et sur les rétroactions climatiques (nuages, albédo, vapeur d'eau).
- Poursuivre le travail concernant les prévisions climatiques (de l'échelle mensuelle à multi-décennale), notamment sur les questions d'initialisation, de calibration, et sur les métriques utilisées pour caractériser les performances des modèles de prévision climatique.

Systèmes d'océanographie opérationnels. Pour leurs prévisions sur des temps relativement courts, ces systèmes à très haute résolution ont un fort besoin d'études portant sur la dynamique des couches de surface, afin d'améliorer sensiblement la représentation des flux à l'interface air-mer (forçage de leurs modèles), des courants de surface, des propriétés (physiques, biologiques et biogéochimiques) de la

couche de mélange océanique et des flux verticaux. Il est sans doute nécessaire dans ce contexte opérationnel d'envisager de nouveaux paradigmes pour l'estimation des flux de surface pilotant ces systèmes qui permettront de s'affranchir de l'approche forcée classique. Un couplage faible avec la couche limite atmosphérique marine, la prise en compte des vagues soit dans les paramétrisations du mélange et des flux air-mer soit par le couplage avec un modèle de vagues, ou les rétroactions de la biologie et de la biogéochimie sur la physique *via* la pénétration des flux radiatifs sont des voies à explorer. À plus long terme, la question du couplage fort océan/vagues/atmosphère se posera pour les systèmes opérationnels, sans doute de façon plus cruciale pour les zones côtières qu'à l'échelle globale.

La météorologie et pollution urbaine, impacts sociétaux. La compréhension des conditions de formation des événements météorologiques extrêmes à fort impact comme les crues soudaines associées aux précipitations intenses, comme les rafales de vent au sein des tempêtes ou encore les vagues de chaleur ou de froid en lien avec les blocages atmosphériques, nécessite des études approfondies sur les processus d'interaction d'échelles. Dans chacun de ces cas, un pré-conditionnement d'échelle synoptique et planétaire est nécessaire pour former un environnement favorable à l'occurrence de l'événement, mais d'autres processus atmosphériques à plus fines échelles (moyenne échelle ou plus petite) s'y ajoutent pour créer l'événement. Les interactions entre atmosphère et surfaces continentales sont également cruciales pour un certain nombre d'événements (p. ex., crues soudaines et vagues de chaleur). L'effort de recherche sur les paramétrisations des processus sous-maille du modèle atmosphérique et des interactions atmosphère-sol est donc important pour *in fine* améliorer les prévisions de ces événements.

Des améliorations sur la modélisation et la prévision des crues rapides méditerranéennes sont attendues. Alors que le couplage entre modèles météorologiques et hydrologiques est maintenant classique, le couplage des modèles hydrologiques avec les modèles d'impact (modèles hydrauliques pour simuler les inondations ou modèles d'impacts sociaux) doit être approfondi. Une meilleure représentation des sols est nécessaire pour produire des cartes de risque de ruissellement. D'un point de vue de la prévision, des méthodes probabilistes doivent être mises en place pour estimer l'incertitude des pluies observées ou en sorties des modèles météo.

La cyclogenèse atmosphérique dépend des interactions air-mer à fine échelle. Malgré la difficulté de réalisation des mesures *in situ* dans ces régions, il semble nécessaire d'augmenter les observations fines des flux aux interfaces air-mer.

Renforcer les connaissances sur les thèmes fondateurs du domaine Océan Atmosphère

L'intensité des cyclones tropicaux et leur déplacement restent difficiles à prévoir et sont des enjeux sociétaux majeurs. Leur représentation dans les modèles de mésoéchelle dépend en grande partie des schémas de microphysique et des couplages aérosol-nuage-précipitation. L'amélioration et la validation de ces schémas ne peuvent se faire que grâce à de multiples confrontations aux observations *in situ* et satellite.

Les processus associés à la formation des rafales au sein des tempêtes font encore débat et dépendent de la région où elles se produisent à l'avant du front froid, au niveau du front chaud rétrograde ou en aval de celui-ci lors de la formation des phénomènes de « sting jets ». Les processus humides agissant sur la formation des vents forts sont encore mal connus tout comme le transfert de quantité de mouvement vers la surface. Plus généralement, la prévision des rafales doit s'appuyer sur les systèmes de prévision d'ensemble à fine résolution (proche de l'échelle convective) qui sont en développement dans les centres opérationnels.

Les vagues de chaleur ou de froid sont fortement dépendantes de l'occurrence de blocages atmosphériques avec les vagues de chaleur dépendant fortement également des interactions air-sol. Malgré une meilleure représentation des blocages avec l'accroissement de la résolution des modèles, de possibles améliorations de leur prévision sont encore à l'étude en affinant les prévisions probabilistes.

La question de l'interaction entre ville, eau et atmosphère a pris une importance sociétale considérable, d'une part pour l'enjeu de l'adaptation face au dérèglement climatique (fréquence accrue attendue d'épisodes de canicule), d'autre part pour évaluer les possibilités de remédiation dans le cadre d'une transition énergétique nécessaire.

Plusieurs leviers d'adaptation de la ville au dérèglement climatique tels que la végétalisation de la ville, l'augmentation des surfaces couvertes par l'eau, l'augmentation de l'albédo sont à l'étude, mais leur efficacité, leur applicabilité, et leurs implications plus larges doivent encore être évaluées et quantifiées. Par ailleurs, il y a une demande sociétale de prévisions météorologiques à l'échelle de la ville ce qui amène à une prise en compte spécifique et à haute résolution des processus responsables de l'îlot de chaleur de la ville dans les modèles de prévision.

La question du ressenti face à la météorologie est une question à aborder avec les sciences sociales.

Les comportements des habitants et usagers dans les bâtiments sont un des leviers les plus importants vers la transition énergétique, car ils contribuent autant que la rénovation à la

diminution des consommations énergétiques. L'autre levier crucial concerne la mobilité en ville et les émissions de GES et de polluants liées aux systèmes de transport, sur lesquels on peut agir au niveau de l'aménagement de la ville et du comportement individuel. Ces champs de recherche offrent des perspectives importantes de collaboration avec les sciences sociales (urbanisme, sciences sociales, etc.).

L'impact du climat et de la pollution urbaine sur le patrimoine reste une question sensible : la modélisation du climat local et de la pollution à petite échelle permet désormais grâce aux nouveaux outils développés d'envisager un couplage avec les modèles d'altération ou de vieillissement des matériaux. Ces modèles nécessitent une compréhension, encore à affiner, des processus d'altération des différents matériaux (à acquérir sur le terrain et en laboratoire).

Au-delà de la qualité de l'air en milieu urbain, la qualité de l'air intérieur est une question sociétale d'importance, dont les atmosphériciens commencent à se saisir, mais qui n'apparaissait pas jusqu'ici dans la prospective Océan Atmosphère. Pourtant, le transfert d'outils et de connaissances acquises en air extérieur vers l'étude des processus chimiques prenant place en air intérieur peut être fait. Cela constitue un axe de recherche novateur, qui permettrait à la communauté d'appliquer ses acquis à d'autres compartiments auxquels l'homme est exposé. Les liens entre qualités de l'air extérieur et intérieur devront être abordés, autant que les spécificités de la pollution de l'air intérieur liées notamment à des activités de construction, d'entretien et de cuisine.

La dynamique des écosystèmes marins. La nature dynamique des échelles spatiales fines (méso- et sub-mésoéchelle) apparaît comme un défi spécifique sur le plan de la préservation des écosystèmes et en particulier pour la mise en place de zones de gestion et la création d'aires marines protégées (AMP) dans l'océan ouvert. Quelle dimension doit avoir une AMP pour inclure la variabilité spatiale interannuelle d'un front ou d'un tourbillon d'importance écologique ? Cette thématique d'actualité répond au « Plan d'action Mer et Océan » récemment annoncé par le ministère de l'Environnement qui vise à étendre les actions de conservation à l'océan du large. Par conséquent, les délimitations des AMP doivent inclure non seulement la variabilité spatiale observée à ce jour, mais également les modifications des courants marins attendus dans les prochaines décennies induites par le changement climatique. Ceci requiert un « downscaling » des scénarios climatiques à la sub-mésoéchelle et leur intégration avec des données satellite et de terrain *end-to-end* (du plancton aux prédateurs supérieurs).

Comment évolueront les habitats des organismes marins,

les niches écologiques des espèces, et en conséquence les assemblages et leurs rôles fonctionnels dans les écosystèmes en fonction des forçages climatiques et anthropiques ? À l'heure des modifications des environnements marins à des échelles décennales, il paraît particulièrement important de poser les questions quant aux trajectoires des écosystèmes (p. ex. stabilité, résilience, dégradations plus ou moins irréversibles), ce qui peut avoir un effet sur les politiques de gestion en termes de restauration, de protection, de réhabilitation, de réaffectation. Des questions importantes à explorer dans ce contexte consistent à pouvoir détecter des modifications de l'environnement, de paramétrer le fonctionnement des écosystèmes et des interfaces (écotones) et de repérer les espèces clés et les espèces ingénieures des écosystèmes.

L'étude du passé offre l'opportunité d'accéder à une gamme très large de situations climatiques (périodes glaciaires / interglaciaires) permettant d'identifier toute l'amplitude des réponses environnementales et de tolérance du vivant. L'impact du changement climatique sur le vivant concerne non seulement la composition des écosystèmes et leur étendue, mais également la caractérisation génétique des individus et des populations. La résilience, la vulnérabilité, l'adaptation et la préservation de la biodiversité sont autant de questions sociétales qui passent par un rapprochement des communautés « physique du climat », « biologie » et « écologie ».

L'étude des rétroactions climatiques sur les écosystèmes marins et leurs services écosystémiques comme les puits de carbone, la régulation des nutriments ou les ressources représente un défi à relever dans les prochaines années.

Les quatre grands systèmes d'upwelling (EBUS pour systèmes d'upwelling de bord est en anglais) suscitent un intérêt particulièrement vif, avec des problématiques communes très fortes et des questions scientifiques transverses à de nombreux égards. En effet, ces EBUS sont parmi les plus productifs de l'océan mondial et accueillent des écosystèmes marins très riches où se concentrent des ressources halieutiques essentielles pour l'alimentation mondiale et l'économie des pays qui les exploitent. Les régions continentales adjacentes aux bords est abritent des zones très arides qui sont la source d'aérosols désertiques pouvant moduler les flux à l'interface océan-atmosphère *via* le bilan radiatif régional, et où les ressources en eau représentent un enjeu agronomique, économique et social majeur. Certaines de ces questions, bien identifiées et socialement importantes, offrent des opportunités intéressantes en termes de structuration de la communauté OA et au-delà. En effet, seule une approche intégrative prenant en compte l'ensemble des processus des interactions terre-atmosphère-océan à toutes les échelles (alliant observations *in*

situ et satellite, et modélisation couplée) dans un cadre socio-économique, permettra d'améliorer les capacités prédictives des modèles régionaux. La meilleure compréhension des liens entre la dynamique des *upwellings*, les écosystèmes marins et la chimie atmosphérique répondra à l'impératif de gérer durablement les ressources halieutiques, mais aussi de préserver la qualité de l'air, les sites patrimoniaux ou les zones récréatives.

Les aérosols et le climat. Les aérosols atmosphériques, en raison de leurs propriétés physico-chimiques (composition, distribution en taille et morphologie), influencent de manière importante le climat *via* leurs effets directs, semi-directs et indirects sur le bilan radiatif et sur la productivité marine. Néanmoins, la quantification de cet impact reste encore entachée d'une barre d'erreur importante qui contribue à l'incertitude sur le forçage radiatif due aux activités anthropiques estimée par le GIEC. La réduction de cette barre d'incertitude et la découverte de nouveaux processus encore ignorés constituent des contributions sociétales de première importance de nos sciences.

La pollution atmosphérique. L'étude de la pollution atmosphérique par les photo-oxydants et les particules reste d'actualité pour notre communauté, car malgré des efforts pour diminuer les émissions, certains seuils réglementaires sont toujours dépassés et les objectifs de qualité non atteints. Il s'agit pour notre communauté de transcrire rapidement les nouvelles connaissances acquises ou en cours d'acquisition sur les sources des pollutions dans les modèles opérationnels de qualité de l'air, utilisés pour la prévision à court terme et des études de scénarios. Ce transfert des connaissances devra permettre à notre communauté de garder une implication importante dans le programme CAMS (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*).

L'impact de la variabilité basse fréquence et des changements climatiques sur la composition de l'atmosphère et la qualité de l'air. Il conviendra de mieux estimer comment, à des échelles régionales, la fréquence de ces événements extrêmes et leur impact sur la composition chimique évolueront dans un climat futur plus chaud. Il sera notamment intéressant d'évaluer l'impact des périodes exceptionnellement chaudes et sèches sur la composition chimique de l'atmosphère, notamment *via* l'impact des feux dont les émissions en gaz et particules (et les produits secondaires qui en découlent) affectent beaucoup la variabilité temporelle de la composition chimique de l'atmosphère et la qualité de l'air. Une autre question émergente est la compréhension et la modélisation de l'évolution des grands cycles de gaz traces (composés organiques, azotés, soufrés, capacité oxydante, particules) au cours des climats passés.

Les nouvelles frontières avec le vivant

Le « vivant » est l'un des acteurs majeurs des cycles biogéochimiques, mais son rôle en OA a initialement été essentiellement associé à la quantification de stocks et de flux de matière. Cette vision a ensuite lentement évolué pour mieux prendre en compte les caractéristiques biologiques des organismes et leur organisation au sein d'écosystèmes en termes de diversité, de fonctions ou d'interactions. En effet, les cycles biogéochimiques marins impliquent des communautés de micro- et macro-organismes caractérisées par une grande diversité taxinomique et fonctionnelle. Comment la structure et la diversité des communautés biologiques régulent-elles les flux des éléments majeurs et traces (« qui fait quoi ? ») ?

La dernière décennie a vu l'explosion de nouvelles approches et de nouveaux savoir-faire issus des approches « omiques », mais aussi de l'imagerie (y compris *in situ*) et de techniques isotopiques pour l'étude de la diversité et des fonctionnalités des organismes marins et notamment des microorganismes. Comment l'étude des cycles biogéochimiques peut-elle tirer profit de ces apports pour répondre aux questions liées au fonctionnement des cycles biogéochimiques et des écosystèmes ?

L'intégration des approches récentes permettra d'aborder ces questions clés à différentes échelles.

À l'échelle des communautés, les approches « omiques » permettent aujourd'hui par exemple de décrire, de manière très détaillée, la biodiversité des communautés qui sont associées à différents cycles biogéochimiques et de mesurer la régulation d'une multitude de gènes, dont certains jouent un rôle clé dans la production et la transformation de la matière. Il est essentiel d'associer ces données à une étude plus globale du fonctionnement des écosystèmes pour progresser sur des questions telles que la succession des communautés planctoniques ou l'organisation ou la réorganisation des communautés face aux facteurs environnementaux incluant les perturbations anthropiques, et de manière ultime de comprendre comment l'ensemble de ces caractéristiques des écosystèmes contrôle les flux biogéochimiques.

L'analyse de la biodiversité devra prendre en compte les associations inter-organismes avec une approche intégrée des

interactomes (ensemble des interactions protéine-protéine). Ceci pose aussi la question de l'évolution des modèles biogéochimiques afin de prendre en compte la diversité des communautés biologiques.

L'afflux massif d'informations délivrées par ces nouvelles approches, notamment le traitement des données de séquençage par bio-informatique, doit faire l'objet d'un réel travail de conceptualisation pour que ces données s'intègrent progressivement à celles produites par les approches plus classiques de mesures de flux et de stocks afin d'apporter une réelle plus-value.

À l'échelle de l'organisme individuel, la biologie des systèmes fait appel à un ensemble d'approches descriptives hautement résolutive et à haut débit (modifications du transcriptome, du protéome et du métabolome) qui peuvent être couplées à une modélisation. Dans cette optique, le développement de ressources génétiques sur des organismes modèles constitue une voie très prometteuse afin d'étudier la régulation de gènes clés en fonction de paramètres environnementaux abiotiques ou biotiques. La modélisation biogéochimique classique pourrait alors s'enrichir progressivement d'une modélisation métabolique.

La composition isotopique et élémentaire des squelettes carbonatés marins (coraux, plancton calcaire, mollusques) accumulés notamment dans les sédiments marins peut fournir une estimation de la température et de l'état du cycle du carbone (système des carbonates) dans les masses d'eau anciennes. Cependant, les minéraux carbonatés constituant des organismes vivants sont rarement formés dans des conditions d'équilibre isotopique avec l'eau et le carbone inorganique dissous. Il existe un contrôle « biologique » par les organismes. Paramétrer ces « effets vitaux » est nécessaire pour utiliser de manière fiable la composition isotopique et élémentaire des squelettes carbonatés comme « proxys » des variables climatiques et environnementales océaniques (niveau de la mer, température, pH...). Le développement des approches couplées d'observation en culture et de modélisation devrait permettre d'améliorer la compréhension de ces « proxys ».

La méso- et la sub-mésoéchelle correspondent à des échelles

de temps écologiquement importantes (quelques jours à quelques semaines). Les fonctions biogéochimiques et écologiques à différents niveaux des écosystèmes, comme le taux de croissance planctonique, la durée des blooms et la durée des transferts et des voies d'alimentation des prédateurs marins, sont concernées par les mêmes échelles de temps. Pour cette raison, la mésoéchelle structure les communautés phytoplanctoniques dans une mosaïque de niches éphémères dont les contrastes physicochimiques maintiennent une grande diversité taxinomique. Comment cette diversité se traduit en fonctions biogéochimiques et comment elle se propage à travers la chaîne trophique restent des questions fondamentales à explorer et se retrouvent donc dans un positionnement clé dans les perspectives actuelles en océanographie.

La coévolution vivant / non-vivant représente un thème très emblématique du CNRS-INSU auquel la communauté OA a peu contribué jusqu'à l'heure actuelle. Cet axe de recherche

très interdisciplinaire se situe à la frontière entre différents domaines tels que Terre Solide (TS) pour l'évolution tectonique et la datation, Astronomie et Astrophysique (AA) pour les conditions de formation du système solaire et l'étude des exoplanètes, Surfaces et Interfaces Continentales (SIC) pour la continentalisation, et naturellement avec d'autres instituts du CNRS tels que l'INEE, l'INSB ou l'INC. Le domaine OA pourra y faire valoir ses fortes compétences sur l'évolution de l'atmosphère, des océans, du climat global, des cycles biogéochimiques globaux. Le lien de rétroaction évolutive entre le non vivant et le vivant, notamment au travers des phases d'oxygénation de la planète et de leur contrôle (régulation), depuis le Protozéroïque ancien (>2,5 milliards d'années) jusqu'au Protérozoïque supérieur (Précambrien) et début du Paléozoïque (jusqu'au Carbonifère, vers 350 millions d'années) avec la formation d'une couche d'ozone stratosphérique et la colonisation des continents par le vivant représente une question importante dans ce contexte.

Les enveloppes océan/ atmosphère/cryosphère dans une vision intégrée du système Terre : cycles et interfaces

Les thèmes fondateurs de OA évoqués dans les chapitres précédents ont pour objets d'étude trois grandes enveloppes du système Terre : l'océan, l'atmosphère et la cryosphère. Ces enveloppes sont en interaction au niveau de leurs interfaces représentant à la fois un lieu d'échange et de transformation de matière et d'énergie sous le contrôle de processus spécifiques. Ces trois enveloppes sont également en interaction avec d'autres compartiments du système Terre. C'est le cas à l'interface avec la zone critique, concept intégrateur lié aux surfaces continentales et défini comme la zone où l'eau interagit avec les surfaces continentales (de la roche mère imperméable au sommet du couvert végétal) et c'est aussi le cas avec la Terre solide notamment au niveau du plancher océanique et des volcans. Le questionnement scientifique lié à ces interfaces prend tout son sens si l'on considère qu'au sein du système Terre la matière évolue au travers de cycles qui la font transiter d'un compartiment à l'autre.

Le questionnement scientifique au niveau des interfaces est ici présenté par type de grandes interfaces et illustré sur le cycle de l'eau.

■ Les interfaces océan/ atmosphère/cryosphère

Dynamique à l'interface océan-atmosphère. Les échanges air-mer d'énergie et de masse (flux de chaleur, d'humidité et de quantité de mouvement) sont à l'origine du couplage entre l'océan et l'atmosphère, et sont en grande partie déterminés par la dynamique de la couche de mélange océanique et de la couche limite marine atmosphérique. Les processus agissant dans ces couches limites sont généralement étudiés séparément. Il existe de nombreuses questions non résolues concernant le couplage des couches limites océaniques et atmosphériques, en particulier les échelles horizontales, du kilomètre à quelques dizaines de kilomètres, où les interactions entre échelles synoptiques et échanges turbulents deviennent importantes et remettent en cause les paramétrisations « bulk »

classiques ; ces dernières approches ne permettent pas à l'heure actuelle une détermination des flux air-mer avec les précisions requises pour la détection des changements climatiques. Il faut donc favoriser les études traitant les couches limites océanique et atmosphérique comme une seule entité pour :

- Produire une analyse cohérente des couches limites océanique et atmosphérique et des vagues à partir d'observations satellite. Le défi de la compréhension reste ouvert pour une estimation quantitative de certains paramètres comme les courants de surface et une exploitation en routine des mesures d'ondes internes, vagues, fronts océaniques et atmosphériques ;
- Étudier le rôle joué par le couplage océan-atmosphère dans la dynamique frontale ;
- Étudier le rôle joué par la variabilité des forçages atmosphériques et ses liens avec la dynamique.

Les émissions à l'interface océan-atmosphère. D'une manière générale, les facteurs biologiques, biogéochimiques et physiques qui contrôlent les émissions à l'interface océan-atmosphère restent encore mal connus. Des études suggèrent une future augmentation des émissions d'aérosols marins due à une augmentation de la température de surface des océans. Les aérosols marins ont un impact sur les systèmes convectifs comme les cyclones tropicaux, ou sur la couverture nuageuse de l'hémisphère sud, là où les concentrations d'aérosols de source terrestre sont relativement faibles. Cet impact dépend de leur concentration, de leurs propriétés physico-chimiques, qui sont étroitement liées aux paramètres physiques de la basse atmosphère, ainsi que de leurs propriétés biogéochimiques marines (enrichissement en espèces organiques).

Un des défis actuels est de comprendre ces mécanismes d'échanges, notamment par vents forts, en particulier dans certaines zones sensibles comme les milieux côtiers.

Le dépôt à l'interface océan-atmosphère. Dans ce domaine, les principales questions concernent le devenir des aérosols pénétrant dans l'océan, les mécanismes mis en jeu pour la solubilisation des aérosols, le rôle de la matière organique

(océanique et atmosphérique), la biodisponibilité des apports atmosphériques et l'impact selon les régions océaniques concernées ainsi que le devenir des dépôts dans la colonne d'eau.

L'Interface eau-sédiments. Au niveau de cette interface, les enjeux résident dans une meilleure compréhension des mécanismes en jeu dans la libération des éléments traces contenus dans les sédiments déposés, ou remis en suspension, ainsi qu'au niveau des mécanismes biotiques et abiotiques qui soustraient des éléments à la colonne d'eau. L'étude du fractionnement isotopique induit à ces interfaces est nécessaire pour améliorer les bilans de ces éléments qui ne sont pas équilibrés à l'échelle océanique. Une réflexion doit aussi être menée pour déterminer la manière optimale d'échantillonnage à cette interface. L'impact des sources de fond sur les grandes échelles et à long terme (par exemple hydrothermalisme) doit être étudié.

Les interfaces océan-atmosphère/cryosphère. L'étude des océans polaires requiert la prise en compte d'un certain nombre de processus spécifiques des hautes latitudes, nord ou sud, dont beaucoup sont en lien direct ou indirect avec les glaces marines et terrestres. On peut citer les échanges air-mer, mécaniques et thermodynamiques, dans lesquels les glaces jouent un rôle actif de modulateur, les transports de chaleur et d'eau douce associés à la dérive des glaces marines, les basses températures qui exacerbent les non-linéarités de l'équation d'état de l'eau de mer, la stratification thermique instable en surface du fait des pertes de chaleur vers l'atmosphère et le rôle primordial de l'eau douce dans la dynamique de la couche de mélange, la formation de haloclines et l'impact sur les échanges verticaux dans la colonne d'eau, les échelles très réduites associées aux tourbillons dans les régions particulièrement peu stratifiées que sont les zones de convection hivernales, les processus associés à la formation d'eau dense ou l'importance des flux de chaleur et d'eau douce *via* les interactions entre l'océan et les glaciers ou plateformes glaciaires. Dans ce contexte, les objectifs sont de: (i) parvenir à une meilleure caractérisation des interactions océan-glace-atmosphère (incluant les processus, la physique de la glace et de la neige, les couches limites atmosphérique et océanique...), (ii) comprendre et prévoir le devenir de la cryosphère et son impact sur la biogéochimie et les écosystèmes, (iii) comprendre les téléconnexions océaniques impliquant les zones polaires (formation d'eau dense, bilan océanique d'eau douce, liens avec les moyennes latitudes...) (iv) évaluer la variabilité climatique en zone polaire et ses liens avec le climat global. Dans ce contexte, l'Arctique et l'Antarctique ont des spécificités importantes en matière de questionnement scientifique.

■ L'interface avec la zone critique (ZC)

● L'interface ZC-Océan : Le milieu littoral

Le littoral, zone de transition entre la terre et l'océan, est caractérisé par une diversité morphologique et écosystémique importante (plaines côtières, zones humides, estuaires, baies et lagunes, dunes, falaises, barrière de corail, plages...). C'est une zone particulièrement importante d'un point de vue économique, sécuritaire et touristique. À l'échelle planétaire, plus de 70 % de la population mondiale (soit plus de 5 milliards de personnes) vit actuellement à moins de 60 km des côtes, et un milliard de personnes vivent à moins de 10 m au-dessus du niveau de la mer actuel. En conséquence, c'est une zone clé pour les applications de l'océanographie opérationnelle et les services marins Copernicus, dont les systèmes de prévisions côtiers sont encore embryonnaires.

Les littoraux connaissent de très fortes dynamiques sous la pression de facteurs d'origine naturelle et anthropique s'exerçant à des échelles multiples (du global au local). Dans un contexte de changement climatique et de pression anthropique accrue, l'objectif sociétal des travaux de recherche sur le littoral est de participer à la réduction de la vulnérabilité des littoraux et à leur bonne gestion intégrée, *via* la capacité à simuler leurs évolutions physiques (trait de côte, érosion, risques de submersion...), chimiques (pollutions, écotoxicologie...), écosystémiques (biodiversité, peuplements, capacités de résistance et de résilience...) et celles des ressources (stocks halieutiques, capacité aquacole, ressources minérales...) ce qui passe d'abord par une bonne connaissance fondamentale des processus en cause.

Le premier groupe d'enjeux scientifiques concerne la compréhension des dynamiques des littoraux à différentes échelles et dans différents contextes météo-marins. Quels sont les forçages (naturels et anthropiques) et les processus de l'évolution morpho-dynamique du littoral selon la nature des littoraux? Comment ces processus se traduisent-ils en matière d'évolution moyenne du trait de côte? Quels sont les impacts des événements météorologiques marins extrêmes en termes de submersion, d'érosion, et de transfert de matière?

Le second groupe d'enjeux concerne la compréhension des processus de transfert et de transformation physique et chimique de la matière. Il requiert de lever des verrous tant sur l'hydrodynamique littorale que sur la dynamique des flux solides (sédimentaires) et dissous (depuis les bassins versants et jusque dans les zones peu profondes : estuaires, embouchures

des rivières et des lagon). Il s'agit notamment d'améliorer la connaissance :

- des processus de mobilisation et de transfert d'éléments majeurs et en traces depuis les bassins versants jusqu'aux zones littorales, en régimes hydrologiques normaux, mais aussi sous l'effet d'événements extrêmes ;
- de la structure 3D des courants littoraux ;
- de la transformation de la houle (du large au rivage) et de la génération d'ondes infra-gravitaires sur des substrats complexes à fort gradient bathymétrique et aux morphologies variables (rugosité et type de fond), avec différents couverts de végétation ;
- des effets de la turbulence et sa paramétrisation dans les modèles ;
- des relations entre les circulations hydrologiques dans le substrat (plage, versant de falaise) et les forçages hydrodynamiques et météorologiques marins ;
- des interactions vent-vagues-courant ;
- des mécanismes de transformation chimique des composés absorbés et dissous en fonction du contexte physique, physico-chimique, sédimentaire ;
- des interactions entre les dynamiques du milieu et celles des peuplements biologiques, y compris dans leurs aspects écotoxicologiques.

Au-delà des questions scientifiques susmentionnées, la prospective Océan Atmosphère souligne que la recherche sur les zones côtières et littorales doit s'attacher à maintenir parallèlement les études des processus fins (très petites échelles de temps et d'espace) et des bilans de matière (cycle des éléments) intégrés dans l'espace (échelle écosystémique) et dans le temps (échelle annuelle à pluri-décennale).

L'étude de l'évolution pluri-décennale des différents compartiments abiotiques et biotiques et de leurs interactions le long de ce continuum, le tout en relation avec les forçages aux échelles locales, régionales et globales, doit maintenant être possible grâce aux données *in situ* et satellite acquises par les services d'observation.

Il convient également de travailler sur des stratégies d'observation qui soient en lien avec le développement des modèles, en prenant en compte les données *in situ* et les données satellite (dont Copernicus, SWOT...). Un effort est à fournir dans les années à venir pour mieux identifier les paramètres nécessaires, la distribution géographique et la fréquence d'acquisition pertinentes des données *in situ*, la complémentarité nécessaire avec les acquisitions spatiales (télédétection satellite), et les outils pour mettre en œuvre cette stratégie globale, en y incluant les pôles de données. Définir des chantiers régionaux prioritaires serait, là aussi, de nature à favoriser l'élaboration et la validation d'une telle stratégie.

• L'interface ZC-atmosphère

Les flux à l'interface. Les processus physico-chimiques aux interfaces, incluant les sols, les plantes, les bâtis sont mal connus. Le rôle de la matière organique et des surfactants sur ces flux reste très peu étudié, par exemple le phénomène de film de matière organique sur les surfaces urbaines.

Les poussières terrigènes émises par érosion éolienne des surfaces arides et semi-arides influencent la composition de l'atmosphère, le bilan radiatif et le climat régional et global (effet direct, semi-direct et indirect), la biogéochimie marine, la chimie hétérogène, les interactions aérosols-dynamique, et les paléoclimats. Parmi les verrous subsistants, on peut noter que : (1) la description des processus physiques d'érosion et d'émission est aujourd'hui relativement bien connue pour le sol nu, mais reste un défi pour le sol partiellement végétalisé et le sol soumis à des pratiques agricoles ; (2) la représentation de la distribution en taille et de la minéralogie des poussières, en lien avec la minéralogie des sols, apparaît comme un défi prioritaire pour estimer des impacts par les modèles ; (3) ceci permettra l'intégration de paramètres nouveaux tels que la réactivité potentielle de surface des poussières minérales, susceptible de modifier la capacité oxydante de l'atmosphère et de constituer un puits d'espèces organiques et une source d'espèces plus oxydées voire d'aérosols organiques secondaires.

Pour la quantification des émissions et dépôts spatialisés des espèces réactives (composés azotés, COV, aérosols), il faut s'orienter vers un changement de paradigme : passer du cadastre au modèle dynamique de surface. Cela pourra s'échelonner en plusieurs étapes en commençant par des cadastres dynamiques spatialisés, pour aboutir à un couplage dynamique des modèles biogéochimique, de végétation et d'océan avec l'atmosphère, incluant une description explicite des échanges bidirectionnels des composés réactifs. Pour construire ces modèles, plusieurs verrous doivent être levés, en particulier : (1) les effets combinés des changements climatiques (CO₂, température, sécheresse) et de la pollution de l'air (ozone, aérosols) sur le fonctionnement biologique de ces surfaces est notamment mal connu ; (2) l'évolution des émissions des espèces réactives (composés azotés, COV, aérosols) avec le changement d'usage des terres et des pratiques doit également être quantifiée.

L'eau : débits et stock sur les continents. Les eaux continentales ont un impact majeur sur la vie terrestre et les besoins domestiques. Elles jouent également un rôle important dans la variabilité climatique. Près de 73 % de la demande mondiale en eau est fournie par l'eau de surface (rivières, lacs et réservoirs artificiels) et 19 % par l'eau souterraine. Le reste provient du retraitement de l'eau usée et de la désalinisation de

l'eau de mer. Il est donc très important d'un point de vue sociétal d'estimer les changements qui pourront affecter le cycle de l'eau continentale. Sa description de plus en plus précise sur les terres émergées permet une meilleure prévision du climat et un contrôle affiné des ressources en eau de la planète. Cependant, les réseaux sol de suivi du niveau des lacs, des fleuves et des aquifères souterrains présentent aujourd'hui une situation très disparate selon les régions du globe. Dans beaucoup de régions, soit parce qu'elles sont peu accessibles, soit parce que les pays concernés sont dans une situation économique difficile, il n'est plus possible d'entretenir des moyens existants et il n'existe donc plus de réseaux de mesure fiables et pérennes.

Depuis plusieurs années, les techniques spatiales de télédétection sont utilisées pour l'étude des variations des masses d'eau dans les grands bassins fluviaux à des échelles de temps allant de quelques mois à plusieurs décennies. Les avantages des systèmes satellite sont bien connus (couverture quasi mondiale, bonne caractérisation des instruments et bonne homogénéité spatiale et temporelle des jeux de données, bon archivage des données passées, continuité des mesures et pérennité des données; plusieurs satellites sont actuellement en orbite ou prévus: programme Sentinel de l'ESA en particulier, et mission SWOT en 2021).

Les archives sédimentaires marines et continentales fournissent des archives uniques à toutes les échelles de temps, et permettent de documenter les changements hydrologiques. Leur exploitation conjointe doit être encouragée.

Le milieu urbain. Les recherches conduites au cours de la période viseront à progresser :

- Dans la connaissance du micro-climat urbain, de sa variabilité à fine échelle et de ses déterminants (échanges d'énergie), notamment au travers des campagnes de mesures et la mise en place de collaborations pérennes avec les collectivités territoriales;
- Dans la modélisation en améliorant les schémas de surface dédiés aux villes, les interactions entre villes et atmosphère, à toutes les échelles;
- Dans les interactions à fine échelle entre qualité de l'air et climat urbain;
- Dans la conception de méthodes pour étudier les impacts et les stratégies d'adaptation des villes au changement climatique.

Il convient de plus de noter que les études sur les villes peuvent intéresser des scientifiques qui n'y prêtaient pas jusqu'alors une attention particulière, les villes faisant partie des surfaces continentales et influençant l'ensemble des processus liés à celles-ci. Le gain en échelle spatiale dans les diverses disciplines liées aux surfaces continentales fait qu'il convient de prendre en compte l'urbanisation sur certains champs disciplinaires étudiés

par la communauté, comme l'hydrologie, le couplage qualité de l'air-météorologie urbaine, etc. La ville peut alors n'être vue que comme une surface (presque) comme une autre, mais avec des processus spécifiques qu'il faut prendre en compte.

■ L'interface avec la terre solide

Les sources hydrothermales représentent les témoins des interactions eau-roche et déversent dans l'océan des fluides chauds (jusqu'à 407°C) et réduits dont la composition chimique est radicalement différente de celle de l'eau de mer profonde, avec des facteurs d'enrichissement jusqu'à 10⁶ pour les micronutriments tels que Fe, Mn, Ni, Cu, Zn et les alcalins. Les principales questions non résolues sont: quel est le devenir de ce flux hydrothermal dans l'océan? Quels sont les ligands inorganiques ou organiques qui stabilisent ou non ces micro-nutriments dans l'eau de mer? Quelle est l'importance du flux hydrothermal dans les cycles biogéochimiques globaux? S'agit-il d'une source ou d'un puits? Quels processus contrôlent la distribution des micronutriments entre la phase dissoute et la phase particulaire, et de là, la biodisponibilité pour les écosystèmes profonds?

■ Cycle de l'eau

L'eau est le vecteur principal pour le transport d'éléments biologiques, géologiques ou chimiques, en particulier pour les échanges aux interfaces entre océan, atmosphère, surfaces continentales, cryosphère, terre solide (O/A/SC/Cr/TS). Les réactions entre ces éléments et les cycles biogéochimiques, en particulier le cycle des éléments trace, se font aussi principalement en milieu aqueux. Il est de plus intéressant de constater que les événements extrêmes (épisodes cévenols, cyclones, etc.) résultent d'interactions fortes entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales dans lesquelles les processus liés au cycle de l'eau jouent un rôle majeur. C'est aussi vrai pour d'autres processus comme ENSO ou encore la propagation de la convection tropicale. L'analyse, la compréhension et la modélisation de ces processus passent donc par le prisme du cycle de l'eau.

La physique associée au cycle de l'eau implique toutes les échelles: de l'échelle moléculaire (pour les changements de phases) à planétaire (pour les téléconnexions entre océan, atmosphère et surface continentale). La compréhension et la modélisation de cette physique sont ainsi un des axes de rupture pour notre connaissance du fonctionnement de l'environnement dans son ensemble, évidemment fondamentale pour les modèles de climat ou les modèles régionaux couplés.

Les flux aux interfaces des milieux O/A/SC/Cr/TS sont ainsi encore très mal maîtrisés. Les paramétrisations existantes de ces flux restent basées sur des approches souvent encore empiriques et avec des marges d'erreur significatives (plusieurs dizaines de % à l'échelle régionale et à haute fréquence). C'est particulièrement vrai pour les flux liés aux changements de phase de l'eau, pour lesquels une approche « microphysique » reste encore largement

...

... à développer et représente un axe de progrès majeur pour l'amélioration des paramétrisations existantes.

Les interfaces entre milieux sont parfois des systèmes environnementaux particuliers pour lesquels une modélisation, voire une physique, spécifique reste à développer. À l'interface entre océan et hydrologie continentale, on peut par exemple identifier les estuaires, les mangroves ou les décharges d'eau souterraine, en incluant les processus de recirculation d'eau de mer dans les sédiments. La mise en place de modèles numériques de circulation océanique de petite emprise demande la prise en compte de leur régime hydrodynamique spécifique. Le développement de systèmes de modélisation, rapprochant modèles d'hydrodynamique continentale et de dynamique océanique, est ainsi un axe de progrès important.

À une échelle plus large, les flux entre les aquifères profonds et le milieu océanique littoral sont aussi un axe de fort intérêt. Ces flux d'eau douce ne sont pour l'heure pas pris en compte dans les modèles océaniques. Même si l'importance de ces flux en matière d'apport d'eau douce reste à évaluer (on estime toutefois qu'ils peuvent représenter une fraction significative des débits fluviaux

sur certains littoraux), ils sont associés à des transferts d'éléments traces qui ont des implications majeures sur les cycles chimiques océaniques. L'évaluation de ces flux spécifiques d'eau douce est donc d'un intérêt fondamental et des observations spécifiques sont nécessaires pour identifier leur importance et prendre en compte leurs effets dans l'océan à échelle régionale.

La maîtrise des flux aux interfaces O/A/SC/Cr/TS passe aussi par l'estimation des stocks d'eau sous toutes ses formes. Des observations existent mais des progrès importants restent à réaliser dans ce domaine. L'optique du cycle de l'eau nous guide vers l'objectif de descendre à une échelle spatiale et une précision de la mesure permettant l'étude des processus. Par exemple, la gravimétrie spatiale a apporté des informations importantes sur la variabilité dans les aquifères profonds, mais à relativement grande échelle. La compréhension des transferts et de l'évolution passe par une observation à échelle plus fine. Pour la cryosphère, l'estimation des stocks par télédétection bute encore sur le problème de la distinction neige/glace, handicapant en particulier la validation et l'amélioration des modèles de glace de mer, et par conséquent des modèles de climat.

■ Anthropisation du système terre et impact

L'étude de l'anthropisation de la planète et de l'environnement, vue comme la détection, la caractérisation et l'attribution de l'influence croissante de l'humanité sur le fonctionnement bio-physico-chimique de la planète, est au cœur de notre activité et de nos prospectives scientifiques. Elle bute aujourd'hui sur de nombreux verrous scientifiques détaillés par ailleurs dans ce document : la régionalisation des modèles (en particulier zones urbaines vs zones rurales) ; la nécessité de fournir des résultats sous forme de densité de probabilité, même larges (« on sait qu'on ne pourra pas dire » est déjà une information) ; une meilleure évaluation de la sensibilité climatique ; une interaction plus forte entre modèles et observations de long terme, pour permettre une meilleure détection – attribution des tendances (p. ex. O₃ troposphérique) et une meilleure évaluation des scénarios d'émissions et de leurs incertitudes ; modifications de l'océan (en particulier l'extension des zones de minimum d'oxygène et son effet sur les chaînes trophiques, et les modifications de la glace de mer).

Elle répond à la demande du public et des décideurs de disposer d'informations sur lesquelles appuyer la décision et la définition de politiques publiques. Ce type d'interaction est simultanément une contrainte et une opportunité qu'il faudra mieux prendre en compte, en particulier dans le cadre actuel de l'émergence des services climatiques et environnementaux.

En fait, cette demande conduit à repenser en partie les contours de notre activité, très en amont dans la définition des objectifs et des moyens et en aval dans la mise à disposition des résul-

tats et l'interaction avec les communautés utilisatrices. En amont, par exemple concernant les projections climatiques ou météorologiques : conserver des sorties de modèles peu utiles de notre point de vue disciplinaire mais cruciales pour d'autres, comme les vitesses de vent permettant des calculs de puissance éolienne, est possible à coût quasi nul, mais nécessite la mise en place d'un cadre de dialogue interdisciplinaire. En aval, toujours concernant les projections climatiques : plus nos résultats de modélisation, ou nos observations, seront accessibles et plus grand sera le risque de mésusage de ces résultats. Éviter de tels mésusages passera d'une part par un effort apporté à l'estimation de l'erreur et à sa communication sous forme de distributions de probabilités, et d'autre part par un effort de diffusion de cette culture, à l'image de ce qui a été mis en place à l'International Research Institute for Climate and Society autour d'ENSO.

Les impacts, ou plutôt les effets de l'anthropisation et leur évaluation, sont au cœur des préoccupations, comme le montre par exemple la mise en place de « GIEC régionaux » dans plusieurs régions de France. On peut s'attendre à voir des évaluations des effets de l'anthropisation sur des échelles de plus en plus fines, rendues possibles par les avancées sur la modélisation de type Large Eddy Simulation en site réaliste et complexe, en particulier en ce qui concerne les interactions entre qualité de l'air et météorologie urbaine, l'exposition des personnes, ou les interactions avec le rayonnement dans les villes très polluées. Les effets de l'anthropisation étudiés ainsi restent clairement du domaine Océan – Atmosphère.

Mais ces effets dépassent souvent le cadre du système Océan – Atmosphère, ou bien leur évaluation s'appuie sur des variables qui ne sont pas directement prises en compte dans le cadre

des sciences de l'atmosphère et de l'océan. De fait, l'étude des impacts impose une approche interdisciplinaire, remettant plus ou moins en cause nos schémas de pensée.

Dynamiques des contaminations. Le terme de « contaminant » est une vision interprétée par l'observateur en fonction de l'effet ressenti par lui (ou par les ressources biologiques ou environnementales qu'il utilise ; toxicologie, écotoxicologie, etc.). Cet effet peut se modifier, voire disparaître, dès lors que le contaminant en question se transforme (d'une spécificité chimique vers une autre) ou se dilue. Il n'est plus alors un contaminant. Il n'y a donc pas de contaminant en soi, mais des contaminations (locales, aiguës, diffuses, temporaires...).

Si l'étude des tendances de l'ozone troposphérique et leur explication ne sont pas une question nouvelle, la réponse n'est toujours pas claire et tous les jeux de données ne sont pas cohérents entre eux. La nature de l'évolution des concentrations observées récemment (au cours des 10 dernières années) dans un contexte de contrôle des émissions régionales de précurseurs et la compréhension de ces évolutions, comme le changement de saisonnalité, en font un questionnement toujours d'actualité.

Afin de limiter les impacts locaux (sur la santé et la végétation) et globaux (capacité oxydante de l'atmosphère, effet de serre additionnel) de l'augmentation des concentrations d'ozone au cours du XX^e siècle, des politiques régionales de réduction des émissions de précurseurs de l'ozone (NOx et COV) ont été mises en place en Amérique du Nord et en Europe depuis les années 1980. En revanche, les émissions de précurseurs en Asie ont largement augmenté, mais sont peut-être en phase de diminution notamment en Chine depuis 2010 (au moins pour les oxydes d'azote).

Les concentrations d'ozone dans l'hémisphère nord semblent s'être stabilisées depuis les années 2000, mais cette image est changeante en fonction des périodes, des zones géographiques et des environnements (urbains/ruraux) étudiés, de même qu'en fonction de l'altitude. Si les déterminants de l'évolution de l'ozone sont généralement assez bien connus au moins qualitativement (émissions anthropiques de précurseurs locales/continentales, les apports stratosphériques, les émissions naturelles par les éclairs et les feux de biomasse), le rôle de leurs évolutions décennales sur les tendances de l'ozone reste mal quantifié. Cette limitation peut aussi avoir un impact sur la confiance accordée à l'estimation du forçage radiatif passé et futur de l'ozone troposphérique.

Le traitement de ces questions doit ainsi s'appuyer sur une approche de plus en plus intégrée associant les séries les plus longues de mesures *in situ* (sol, sondages, avions), mais maintenant également issues des satellites et des modèles, et ayant éventuellement recours aux techniques d'assimilation pour pro-

duire des analyses d'ozone sur des périodes au moins décennales.

La pollution particulaire a des effets délétères sur la santé qui en font aujourd'hui une des premières causes de décès liés à l'environnement (7 millions de morts prématurées par an, données OMS). Au moins trois défis se posent à la communauté :

D'abord, franchir le fossé entre la caractérisation des concentrations des polluants dans les milieux (fond urbain, quartier, rue...) et l'exposition des personnes. Cela nécessite des capacités de mesures miniaturisées portables et de modélisation à très petite échelle croisées avec les profils d'activité des personnes.

Ensuite, la chimie atmosphérique peut aider à dépasser les dichotomies entre études toxicologiques, limitées à un nombre restreint de molécules, et épidémiologiques travaillant avec des polluants « proxys » sans que soit nécessairement établi un lien mécanistique avec l'impact sur la santé. Un des mécanismes clés à l'origine des effets toxiques des particules en suspension (PM, pour particulate matter) est qu'elles véhiculent des espèces oxydantes capables de perturber l'équilibre redox cellulaire et de générer un stress oxydant dans l'organisme. Une grande variété de méthodes a été développée pour mesurer la capacité des PM à catalyser la génération des ROS (espèces réactives de l'oxygène) *in vivo*, définie comme le « potentiel oxydant » des aérosols. Ces méthodes chimiques, bien plus rapides et moins coûteuses que les tests cellulaires généralement utilisés, donneraient une vue intégratrice de l'impact de la pollution (particulaire) sur la santé. Elles ont encore besoin d'être améliorées, standardisées et corrélées avec les données toxicologiques et épidémiologiques, pour être ensuite appliquées sur le terrain et en laboratoire. En laboratoire, la création d'atmosphères « types » bien définies pourra aider à s'affranchir des problèmes de représentativité des masses d'air.

Interactions entre ville, qualité de l'air et climat urbain. Les avancées sur la modélisation de type Large Eddy Simulation en site réaliste et complexe ouvrent des perspectives de recherches ambitieuses sur l'étude des interactions entre qualité de l'air et météorologie urbaine. Si la quantité totale d'aérosols peut être bien estimée, les aspects liés à leur composition chimique, à leur transformation, ainsi qu'à leur interaction avec le milieu urbain, sont bien moins connus. Les études porteront par exemple sur :

- l'interaction en milieu urbain de panaches chimiques réactifs distincts et paramétrisation des couplages turbulence-chimie dans les modèles à mésoéchelle ;
- l'étude de la toxicité des aérosols suite à ces transformations en milieu urbain ;
- l'étude du dépôt des gaz, de la remise en suspension des polluants en milieu urbain, et leur paramétrisation ;
- les interactions avec le rayonnement, notamment pour les villes très polluées comme les mégapoles asiatiques ou américaines.

Études intégrées régionales

Dans le contexte de la prospective Océan Atmosphère, les études régionales intégrées peuvent être définies comme des recherches focalisées sur une région donnée, combinant à la fois observation et modélisation dans les différents domaines d'OA. La valeur ajoutée doit découler de la fédération des expertises permettant d'atteindre des objectifs ambitieux. Le caractère intégré et pluridisciplinaire des approches peut conduire à déborder largement le cadre du domaine océan-atmosphère. D'un point de vue opérationnel, lors des deux précédentes décennies, ces études intégrées ont essentiellement été déclinées en termes de chantiers, pour mémoire AMMA, puis le chantier MISTRALS et le Chantier Arctique Français (CAF) qui concernent directement la prospective actuelle. Dans ce document sont retranscrits les résumés des prospectives pour les programmes des chantiers MISTRALS et CAF qui sont étroitement liés au domaine OA. Bien que ces prospectives aient été élaborées avec un calendrier et des attendus différents, les objectifs scientifiques affichés dans ces études intégrées s'insèrent parfaitement dans les questionnements scientifiques de la prospective générale OA développés ci-dessus.

■ La Méditerranée et le chantier MISTRALS

MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales) est un méta-programme international de recherches et d'observations interdisciplinaires dédié à la compréhension du fonctionnement environnemental du bassin méditerranéen sous la pression du changement global pour en prédire l'évolution future. Le fil conducteur initial de MISTRALS concerne l'habitabilité en zone méditerranéenne et les enjeux de ressources en eau, de territoire et d'impacts du changement global. Dans ce vaste cadre, 8 programmes ont été élaborés au cours de la 1^{re} phase 2010-2015. Parmi eux, 4 programmes relèvent d'OA et ont été construits autour des 4 grands thèmes suivants. La chimie atmosphérique avec le programme ChArMEx (*Chemistry-Aerosol Mediterranean eXperiment*) qui a pour objectif de dresser un bilan actuel et d'anticiper l'évolution future de l'environnement atmosphérique du bassin méditerranéen et de ses impacts sur le climat régional, la qualité de l'air et la biogéochimie marine et continentale. Le cycle de l'eau avec le programme HyMeX (*Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment*) qui vise à améliorer la compréhension du cycle de l'eau en Méditerranée,

avec un intérêt particulier pour l'évolution de la variabilité climatique et pour la genèse et la prévisibilité des événements intenses associés au cycle de l'eau. La biogéochimie et les écosystèmes marins avec le programme MerMex (*Marine Ecosystems Response in the Mediterranean eXperiment*) qui est centré sur les évolutions biogéochimiques et biologiques qui vont s'opérer au sein de la mer Méditerranée, du fait des changements naturels ou anthropiques, et sur la manière dont ils vont influencer sur les écosystèmes marins et la biodiversité. Le changement climatique au cours de l'holocène avec PaleoMeX (*Paleo Mediterranean eXperiment*) qui est consacré à l'étude du changement climatique de l'aire méditerranéenne au cours de l'holocène, soit depuis 10 000 ans environ. De façon générale, il s'agit d'appréhender les interactions entre climat, sociétés et civilisations du monde méditerranéen sur cette période.

Pour la période 2015-2020

Les orientations proposées par ChArMEx reposent sur une nouvelle phase expérimentale où la priorité a été mise sur le bassin oriental, après la première phase en grande partie consacrée à de grandes campagnes d'été dans le bassin occidental. Les priorités sont consacrées aux relations pollution-santé, en lien avec les sciences médicales, économiques et environnementales et aux relations aérosols-climat-cycle de l'eau à l'échelle régionale. Les études au sein de cet axe s'effectuent en lien avec la modélisation régionale couplée océan-atmosphère de HyMeX et à l'interface air-mer en lien avec MerMex. Ceci inclut des études pour quantifier les émissions marines, organiques en particulier avec la formation de nouvelles particules par nucléation, et le dépôt atmosphérique et son impact sur la biologie et la biogéochimie marine (campagne PEACETIME).

Le programme HyMeX propose deux grandes orientations. La première concerne les approches multi-échelles autour des objets d'étude HyMeX que sont les pluies intenses, les dépressions méditerranéennes, la circulation océanique et la formation d'eaux denses. La seconde orientation propose de contribuer à des études intégrées et pluridisciplinaires autour de la sécheresse et des ressources en eau, des crues rapides et des vulnérabilités associées, de la prévision intégrée des pluies fortes aux impacts, et du cycle de l'eau et de l'énergie renouvelable.

Le programme MerMex propose de se concentrer sur des questions spécifiques liées à l'impact des processus naturels

et des facteurs anthropiques sur le fonctionnement et l'état des écosystèmes marins méditerranéens. La première, intitulée MERITE (*Marine ecosystem response to the input of contaminants in the coastal zone*), vise à étudier le devenir des contaminants chimiques et leurs impacts sur les habitats benthiques et pélagiques, d'écosystèmes côtiers spécifiques, tels que les baies urbanisées et contaminées et les zones de pêche de Méditerranée occidentale et centrale. La deuxième, PEACETIME (*Process studies at the air-sea interface after dust deposition in the Mediterranean*), en collaboration avec ChArMEx, concerne l'impact des dépôts atmosphériques avec pour objectif d'évaluer l'impact des mécanismes à l'interface océan-atmosphère sur le fonctionnement des cycles biogéochimiques, l'écosystème pélagique et les rétroactions vers l'atmosphère aujourd'hui et dans le futur. La troisième, PERLE (*Pelagic ecosystem response to dense water formation in the Levant experiment*), concerne l'étude de la formation et la diffusion de l'eau levantine intermédiaire en Méditerranée orientale et leur rôle sur la distribution des nutriments et la structuration des écosystèmes planctoniques.

Le programme PaleoMeX propose d'utiliser le jeu de données unique d'enregistrements continentaux et marins acquis dans la région méditerranéenne lors la première phase de MISTRALS pour mener des expériences de modélisation climatique à l'échelle régionale et mettre en œuvre des approches statistiques. L'objectif est de passer de l'échelle régionale à l'échelle locale pour traiter des questions d'éventuels collapses ou au contraire de résilience ou d'adaptation des sociétés complexes qui se succèdent depuis le Néolithique face aux changements climatiques rapides ou d'autres types de changements environnementaux abrupts.

■ Arctique : Chantier Arctique Français

Le Chantier Arctique Français (CAF) a été créé afin 1) de stimuler le lancement d'initiatives de recherche fortement transdisciplinaires justifiées par la nature des questions scientifiques (des sciences de l'univers aux sciences humaines et sociales), 2) de créer une communauté de chercheurs qui ont en commun de mener des activités de recherche en Arctique, et 3) de rendre visible la recherche française en Arctique pour favoriser les collaborations au niveau international.

La synthèse de prospective du CAF (2015-2020) fait apparaître six priorités en lien avec le domaine Océan Atmosphère. Elles sont rappelées ci-après avec leurs objectifs généraux.

La variabilité atmosphérique arctique et globale: amplification, couplages et impacts. Les objectifs sont

d'identifier les connexions entre variabilité arctique et climat global et de comprendre les mécanismes atmosphériques sous-jacents tels que transport et téléconnexions, de préciser le rôle des interactions avec la surface, notamment l'impact de la cryosphère arctique sur la variabilité atmosphérique globale, ou a contrario l'impact des anomalies dynamiques des plus basses latitudes sur les modes de variabilité atmosphérique en Arctique, de mieux comprendre les mécanismes responsables de l'amplification polaire, d'évaluer le réchauffement actuel en Arctique à l'aune des climats passés, d'en déterminer les impacts sur les activités humaines et d'en mesurer la perception par les peuples autochtones, de prévoir ce que sera le réchauffement en Arctique au cours du prochain siècle et d'évaluer les modèles de climat utilisés pour les risques futurs par rapport aux changements passés.

Le cycle de l'eau et les glaces terrestres. Les objectifs sont de mieux comprendre les différents compartiments régissant le cycle de l'eau et leurs impacts sur le climat, de mieux comprendre et modéliser l'évolution des glaces terrestres arctiques pour anticiper leur devenir et améliorer les scénarios climatiques, de suivre la contribution de la diminution des glaces terrestres arctiques (glaciers et petites calottes, calottes du Groenland) à l'élévation du niveau des mers et leurs impacts, de caractériser l'évolution passée de ces glaces pour éclairer notre compréhension de leur évolution actuelle et évaluer la capacité de nos outils (observations et modélisation) à les représenter.

Un océan en mutation: du milieu physique aux écosystèmes marins. Les objectifs sont d'étudier la variabilité de l'océan Arctique et les modifications en lien avec l'évolution du climat, de mieux comprendre les processus contrôlant la distribution des glaces de mer arctiques afin d'affiner les prévisions d'englacement de l'Arctique aux échelles locales et globales, d'évaluer les liens entre changements régionaux et variabilité océanique globale, d'identifier les interactions majeures entre le milieu physique (océan et cryosphère marine) et les cycles biogéochimiques marins, d'étudier les effets combinés des mutations en cours dans l'océan Arctique sur l'ensemble des écosystèmes marins de l'océan Arctique, benthiques ou pélagiques, côtiers ou hauturiers, depuis la boucle microbienne et la production primaire jusqu'aux vertébrés, pour aider notamment à l'élaboration de scénarios écologiques futurs destinés aux populations riveraines.

Dynamique du pergélisol en contexte de réchauffement climatique. Les régions sous le cercle polaire comportant un sol gelé permanent (pergélisol) subissent de plein fouet les conséquences du réchauffement climatique entraînant le développement de modèles périglaciaires liés à la fonte de ce

sol gelé. L'augmentation de la température de l'air provoque une élévation de la température du sol gelé (de 1°C) depuis les années 1980 et un approfondissement de la couche active (couche superficielle dégelant l'été). Les résultats de modèles selon les scénarios climatiques du GIEC indiquent qu'au milieu du XXI^e siècle, les surfaces de pergélisol dans l'hémisphère Nord sont susceptibles de diminuer de 35 % à 80 %, principalement en raison de la fonte du pergélisol. Des travaux indiquent qu'en 2050, la profondeur du dégel saisonnier pourrait augmenter de 15 % à 25 %, voire 50 % dans les régions les plus septentrionales. La fonte de ce pergélisol peut libérer des gaz à effet de serre, qui vont accélérer le réchauffement. L'ensemble de ces phénomènes se traduit par de fortes rétroactions entre le climat, la végétation, la neige, le pergélisol et l'hydrologie.

L'objectif est d'aller vers un programme intégré sur le continuum terre-mer en Arctique. Les transferts entre les surfaces terrestres et l'océan Arctique se font le long d'un continuum dont il est important de ne pas séparer les compartiments, tous étant interdépendants. L'objectif scientifique est ici de comprendre les mécanismes, de déterminer les flux et leurs conséquences sur les écosystèmes et les sociétés arctiques des bassins versants continentaux jusque dans l'océan où les archives sédimentaires se constituent sur les marges.

En ce qui concerne le cycle et les impacts de la pollution, il s'agit d'améliorer la quantification des sources anthropiques (et naturelles) de pollution, aussi bien proches que lointaines, et de mieux caractériser leurs processus de transformation et leurs impacts sur les milieux physiques (atmosphère, océan, cryosphère, sol, lac) et les populations locales en région arctique. L'un des enjeux majeurs actuellement réside dans une meilleure compréhension des impacts anthropiques liés au développement économique et au réchauffement de l'Arctique.

■ Antarctique

Le système climatique austral a rapidement changé au cours des dernières décennies : réchauffement régional de l'atmosphère, réorganisation des vents associée à une intensification du mode climatique « annulaire austral », réorganisation spatiale de la glace de mer, acidification, réchauffement et désalinisation océanique, réduction de la population de krill, fonte de certains glaciers flottants, et accélération de l'écoulement d'importants glaciers de l'Antarctique de l'Ouest et de la Péninsule. Ces changements du système climatique austral ont un impact planétaire. Par exemple, les changements océaniques peuvent affecter la capacité future de l'océan Austral à absorber la chaleur et le carbone atmosphérique, et *in fine* sa capacité à faire tampon au changement climatique (il absorbe à l'heure actuelle environ 50 % de carbone océanique anthropique, et de plus de 75 % de chaleur océanique anthropique) ; l'évolution du bilan de masse du continent antarctique a un impact majeur sur l'élévation future du niveau des mers, et représente une des incertitudes principales dans les prévisions de l'impact sociétal du changement climatique associé à la montée des océans. De tels changements ont sans doute eu lieu dans le passé en réponse à des forçages naturels paléoclimatiques, engendrant des déséquilibres majeurs du climat terrestre. Il est urgent de comprendre les évolutions actuelles, forcées aujourd'hui par des phénomènes anthropiques, à la lumière des événements paléoclimatiques.

Il existe en France une importante communauté active aux hautes latitudes australes, avec une grande diversité d'approches, reconnue sur le plan international. À l'heure actuelle, cette communauté est naturellement structurée au niveau des différentes disciplines (océan, atmosphère, cryosphère, biosphère, surfaces terrestres, terre interne) alors même que notre compréhension des questions scientifiques majeures en Antarctique nécessite d'appréhender les échanges et processus aux interfaces entre les différents milieux, souvent à la croisée des disciplines. Il s'agit d'un défi majeur pour les recherches en Antarctique car la région d'étude à traiter est très vaste, s'étendant depuis la région subantarctique jusqu'aux côtes de l'Antarctique et à l'ensemble du continent au travers de zones de transition complexes.

À ce jour, la communauté de recherche nationale n'a pas élaboré de prospective antarctique, mais les éléments de prospective produits par le CSTP IPEV pour la définition d'un plan stratégique de la recherche scientifique française en Antarctique et Subantarctique (2016-2021) montrent que le potentiel de recherche de la communauté OA est en

...

... mesure de répondre aux grands enjeux à venir. Parmi les dix enjeux mis en avant par le CPST, sept relèvent plus directement des disciplines OA, à savoir :

- mieux comprendre le fonctionnement de l'atmosphère en zone antarctique et subantarctique ;
- mieux comprendre le fonctionnement de l'océan Austral et son rôle dans le changement climatique ;
- mieux appréhender l'évolution du bilan de masse de la calotte glaciaire antarctique, en comprendre les mécanismes, prévoir son évolution future et sa contribution à l'élévation du niveau de la mer ;
- mieux documenter l'évolution passée du climat, en comprendre la dynamique pour mieux apprécier le rôle des régions australes dans l'évolution future du climat ;
- mieux comprendre les conséquences des changements climatiques en cours sur le fonctionnement et la dynamique des écosystèmes antarctiques et subantarctiques ;
- mieux comprendre le rôle et l'impact croissant des espèces invasives sur les organismes et les écosystèmes polaires ;
- mieux comprendre les interactions entre différents facteurs de changements environnementaux.

Sur le plan des approches méthodologiques, la communauté nationale est fortement impliquée dans les futurs programmes spatiaux visant à une caractérisation plus fine de la calotte antarctique et de sa dynamique, ou à une meilleure connaissance de la dynamique à fine échelle de l'océan Austral et de ses liens avec la structuration des écosystèmes ou à une meilleure description de la composition atmosphérique. La possibilité d'accéder à des archives de glace anciennes sur la calotte permettra par ailleurs d'envisager de mieux comprendre les oscillations glaciaires/interglaciaires de grande amplitude telles que la transition du Pléistocène moyen. Le maintien de l'effort d'observation de terrain dans cette région, tant au travers de campagnes que des réseaux d'observations (niveau de la mer, ozone atmosphérique, carbone océanique, neige...), permettra d'envisager de mieux

comprendre les tendances climatiques et les processus qui les gouvernent, ainsi que leur lien avec le changement global. Enfin, l'effort soutenu de la communauté pour une modélisation adaptée au milieu antarctique (écoulements glaciaires, dynamique atmosphérique au-dessus de reliefs orographiques importants, couches limites atmosphérique et océanique en interaction avec la cryosphère, échanges côte-large, interaction glaciers/plateformes glaciaires – océan...) doit permettre d'avancer vers une compréhension intégrée des processus et de leur variabilité.

Tout en travaillant dans le cadre de collaborations internationales très actives, la communauté nationale travaillant sur l'Antarctique a l'ambition de mieux se structurer afin de répondre de façon plus cohérente aux grandes questions de recherche évoquées précédemment et d'améliorer sa lisibilité, notamment pour répondre aux enjeux de programmation scientifique au plan national et européen. Cette ambition est aussi nourrie par la nécessité d'une coordination efficace pour mobiliser les moyens importants qui lui sont nécessaires du fait des coûts d'accès au terrain particulièrement élevés, tant au niveau des opérateurs nationaux (IPEV, Flotte) qu'internationaux. La structuration de la communauté antarctique apparaît comme une initiative incontournable considérant (i) la motivation forte des équipes de recherche à disposer d'un lieu d'échange pour construire des projets et (ii) l'opportunité que représentent les moyens importants dont la France dispose dans cette région. Reste que ces moyens sont focalisés aux secteurs Subantarctique et Antarctique de l'Est, alors même que nos équipes sont également impliquées en Antarctique de l'Ouest, et qu'en l'absence de navire océanographique polaire, une solution reste à trouver pour permettre à la communauté scientifique d'accéder aux régions océaniques englacées. La mise en place d'une structure à définir pourrait être ce lieu d'échange, avec pour objectif de mûrir la réflexion en cours, définir les contours thématiques d'une prospective et déboucher sur des programmes structurants.

Observation et modélisation : consolider et innover

■ Modélisation numérique

L'amélioration de la façon dont les processus sont représentés dans les modèles numériques est un travail de fond qui doit être mené de façon continue. Des avancées méthodologiques importantes ont eu lieu ces dernières années, permettant de mieux asseoir ces développements, comme l'utilisation de simulateurs d'observables pour des comparaisons plus rigoureuses avec des mesures issues de sites instrumentés, de satellites ou de paléo-enregistrements, ou l'utilisation d'études de cas permettant l'utilisation croisée d'observations, de modèles à très haute résolution et de modèles à plus grande échelle. La création de dynamiques de travail dans lesquelles des outils différents sont utilisés pour étudier une même question ou un même mécanisme est particulièrement prometteuse. Ces activités sont très exigeantes en coûts de calcul.

Concernant l'évolution des modèles climatiques, l'accroissement de la résolution, même s'il ne résout pas tous les problèmes, est une priorité. En effet, la longueur des simulations à réaliser (plusieurs centaines ou milliers d'années) contraint à utiliser un maillage horizontal nettement plus grossier que ceux utilisés en prévision météorologique ou en étude de processus, alors qu'une résolution plus fine permettrait de mieux représenter les écoulements atmosphériques et océaniques, les effets de l'orographie et les interactions d'échelles. L'augmentation des capacités de stockage doit permettre l'augmentation de la fréquence temporelle des sorties de climat (au minimum journalières) pour faire des études plus fines à l'échelle de l'événement météorologique. Les ponts entre études de climat et études de processus seraient ainsi facilités. D'autre part, les modèles couplés globaux français ne sont pas encore couplés aux modèles des calottes groenlandaise et antarctique. De nombreuses difficultés techniques expliquent cela, et notamment le rôle des fines échelles (fleuves de glaces sur les calottes, interaction océanique au niveau des plateformes de glace flottante, etc.) sur la dynamique grande échelle des calottes. Une initiative nationale vise le développement d'Elmer/Ice-Sheet qui sera un modèle de calotte compatible avec les modèles de climat tout en en représentant les fines échelles aux marges de la calotte. Une autre difficulté importante est la représentation du bilan de masse de surface dans les modèles de climat, qui demeure de qualité insuffisante pour contraindre

les modèles de calotte, du fait de la mauvaise représentation des processus physiques spécifiques aux régions polaires. Des développements dans ces directions doivent être poursuivis.

Dans un contexte où la résolution des modèles globaux augmente sans cesse, le lien entre modèles globaux et régionaux est également un axe stratégique dans lequel il est nécessaire de mieux faire ressortir la complémentarité des approches. La compréhension des caractéristiques régionales du climat en lien avec les téléconnexions et les mécanismes à grande échelle demande une attention particulière, au-delà de – et complémentaire à – la descente d'échelle. Prendre en compte à la fois les spécificités régionales et la variabilité grande échelle est nécessaire pour étudier le changement du climat, le lien climat-environnement, et faire des études d'impact.

Pour la dynamique dans l'océan, les efforts à entreprendre s'inscrivent dans deux directions : (1) accroître la résolution pour mieux prendre en compte les effets de la géométrie des bassins océaniques et de la mésoéchelle sur la dynamique de grande échelle ; (2) introduire de nouvelles équations de conservation dans le système afin de simuler les différents réservoirs sous-maillages d'énergie (énergie de mésoéchelle, ondes internes, turbulence de petite échelle) et donc de mieux contrôler les cascades d'énergie dans l'océan.

Pour la biogéochimie marine, le défi majeur est l'intégration de la complexité des écosystèmes marins, notamment la biodiversité, la structure des réseaux trophiques et des interactions d'échelles. De nouvelles techniques d'analyse et de nouveaux outils pour diagnostiquer et comprendre cette complexité des cycles des éléments sont requis. Des modèles flexibles, génériques, les plus complets possible, faisant appel à une calibration minimale devraient être développés. Un travail de modélisation focalisé sur la variabilité interne ou forcée autant que sur l'état moyen devrait être engagé. La compréhension en amont de la structure de modèle (comportement, émergence) avec une liaison potentielle avec l'assimilation de données est nécessaire. La co-construction entre modélisateur et expérimentateur est cruciale dans ce développement.

Pour les littoraux, il s'agit de développer des outils numériques pertinents pour simuler l'évolution à long terme des côtes

sableuses. Ces approches doivent inclure l'impact des forçages permanents ou réguliers (haute fréquence), mais aussi celui des événements extrêmes de haute énergie (basse fréquence). Il faudra privilégier d'une part les approches de modélisation à complexité réduite (p. ex. lois de comportement général) et, d'autre part, les modélisations basées sur une approche fine des processus physiques qui, grâce à des développements récents, peuvent désormais être appliquées aux évolutions pluri-décennales.

Pour l'atmosphère, l'intégration du nouveau cœur dynamique permettra de réaliser de façon beaucoup plus efficace des simulations à très haute résolution. À plus long terme, il faut sérieusement envisager le développement d'une version non hydrostatique et une révision des paramétrisations qui permettront de réaliser des simulations globales de type *Cloud Resolving Models*. Il existe néanmoins des barrières scientifiques et technologiques importantes pour réaliser des simulations climatiques à très haute résolution, qui devront focaliser les efforts à l'échelle nationale, voire européenne. Les modèles de chimie-transport sont indispensables pour identifier l'importance relative des processus en jeu et réaliser des études de scénarios à différentes échelles, incluant également l'impact du dérèglement climatique sur la chimie atmosphérique. Les modèles développés dans la communauté vont vers une meilleure représentation des couplages entre chimie et météorologie, mais également à l'interface avec la surface. Outre cette approche couplée, la nécessité d'une meilleure intégration des échelles pour une meilleure représentation du transport, de l'évolution de la composition chimique des panaches au cours du transport et de leurs impacts (sur les bilans de pollutions et les bilans radiatifs sur une échelle régionale, voire globale) paraît toujours primordiale. Un effort doit être fourni pour améliorer et valider la modélisation des événements précipitants, y compris leur effet sur les flux de matière et le lessivage des polluants de l'atmosphère.

La chimie atmosphérique est un problème de grande échelle où une émission locale pourra avoir des effets sur des régions très étendues, voire sur l'ensemble du globe. L'étude du transport à longue distance de la pollution (régional, intercontinental) est réalisée en combinant modélisation 3D (régionale, globale) et observations à grande échelle (réseaux *in situ* et télédétection, observations satellite, campagnes intensives). Le maintien et le développement de ces observations complémentaires sont indispensables. La variabilité temporelle de la composition de l'atmosphère est fortement liée à celle de la météorologie et du climat. De nouvelles observations satellite (et leur combinaison) donnent une information sur la chimie à une échelle de plus en plus fine (en vertical et horizontal). Nous disposons dorénavant

d'observations au moins décennales pour un nombre croissant de molécules (O_3 , CO , CH_4 , $HCHO$, NO_2 , SO_2 , NH_3 ...), qui permettent d'aborder cette variabilité et les tendances à long terme.

■ Instrumentation et acquisition de données

Le domaine de la biogéochimie marine à fine échelle requiert le développement des instruments biophysiques capables de résoudre la variabilité sub-mésoscale dans l'espace et le temps. Les études *in situ* requièrent l'utilisation de systèmes d'acquisition existants (véhicules tractés, cytométrie à haut débit, etc.), celle d'échosondeurs multifréquences pour les niveaux trophiques intermédiaires, de « biologgings » de prédateurs supérieurs composés de capteurs multiples à haute résolution et de plateformes autonomes à haute fréquence comme les profileurs et les gliders. Une approche nouvelle de l'observation de la dynamique en trois dimensions de l'océan avec un minimum de perturbation dans toutes les conditions météorologiques ainsi que la mesure des flux à l'interface air-mer dans des conditions de vent fort et aux petites échelles de temps sont un nouveau défi qui pourrait être relevé à partir de nouvelles plateformes telles que le Polar Pod.

Dans le domaine de la thématique chimie-transport, le manque de résolution verticale d'un certain nombre d'observations de routine, par télédétection en particulier, a été noté ainsi qu'un manque de détail chimique. Le développement d'instrumentations innovantes et les futures missions satellite dans lesquelles la communauté est fortement impliquée (EarthCARE pour les aérosols, IASI-NG pour les gaz traces et les aérosols) permettront très certainement d'améliorer la représentation du transport à longue distance. Le développement d'instrumentations miniaturisées à embarquer sur des porteurs appropriés (avions, ballons, drones...) ou déployées en grand nombre pour caractériser un environnement urbain à très fine échelle, présente également des perspectives importantes pour mieux comprendre l'évolution chimique des panaches au cours du transport.

La spectroscopie d'absorption est une source reconnue de données précieuses pour la modélisation de l'atmosphère, pour l'inversion des données satellite ou la modélisation du transfert radiatif lié à l'effet serre. Du fait de l'amélioration de la qualité des mesures atmosphériques (en particulier satellite), les exigences en termes de précision et de complétude des données spectroscopiques sont accrues. Les demandes de données spectroscopiques de laboratoire concernent notamment les profils de raie très précis et la caractérisation des faibles absorptions dans les fenêtres de transparence atmosphérique,

y compris les continua d'absorption tels que celui de la vapeur d'eau pour lesquels un modèle semi-empirique manquant de validation fait encore référence dans les codes de transfert radiatif. Le problème ancien de la cohérence des coefficients d'absorption des bandes de l'ozone entre l'IR et l'UV reste aussi un chantier important. Aborder ces problèmes nécessite un investissement de recherche pour le développement de nouvelles techniques laser ultrasensibles pouvant accéder à des plages spectrales de plus en plus étendues. Les cavités optiques de haute finesse ont désormais démontré leur apport vis-à-vis des méthodes plus classiques et deviendront un outil incontournable pour les mesures d'absorptions faibles. De même, les peignes de fréquence sont en train de devenir un outil indispensable pour la spectroscopie moléculaire de grande exactitude. L'application de sources nouvelles, telles que les lasers femtoseconde, pourra permettre la mesure de molécules réactives, y compris des radicaux, en concentrations extrêmement faibles.

Pour la zone littorale, que ce soit pour la composante hydrodynamique ou le transfert sédimentaire, la compréhension des mécanismes qui contrôlent la dynamique littorale nécessite le développement de dispositifs expérimentaux flexibles et robustes pouvant être déployés « à la demande » pour suivre finement certains événements extrêmes identifiés quelques jours, voire quelques heures à l'avance. Ces dispositifs doivent permettre d'accéder à la mesure de paramètres clés [vitesses de courant (frottement) à proximité du fond, flux de sable transporté par charriage, caractéristiques des mélanges de matériaux hétérogènes, turbulence dans les zones à forte concentration en sédiment...]. Il est également nécessaire d'améliorer la couverture spatiale et la résolution spatio-temporelle des levés topo-bathymétriques. Les méthodes de suivi par photogrammétrie à l'aide de drones aériens et, à terme, marins, en plein essor, auront ici un rôle central à jouer.

Les développements techniques et méthodologiques sur le couplage de méthodes acoustiques et optiques actives et passives opérés *via* différents types de plateformes (aérienne, marine, sous-marine, etc.) seront également déterminants.

■ Synergie modèle-données / approche probabiliste en modélisation / appropriation de nouvelles méthodes d'analyse numérique

Une question scientifique peut en général être abordée avec une large palette d'outils (modèles, observations, méthodes), de

différents niveaux de complexité. Se pose donc naturellement la question de l'adéquation optimale des outils aux questions scientifiques posées : comment tirer le meilleur parti des nombreuses sources d'information disponibles ? Comment choisir la complexité de modèle, les données d'observation, les méthodes d'analyse ou d'assimilation menant aux meilleurs résultats ? Peut-on dégager des critères pour guider ces choix ?

De façon liée, comment mieux faire connaître et diffuser au sein de notre communauté les méthodes performantes existantes (techniques d'analyse de données et de systèmes, outils de visualisation en grande dimension, schémas numériques performants, outils logiciels...) qui peuvent apporter une réelle plus-value scientifique mais dont l'usage n'est pas encore forcément généralisé ?

Un certain nombre de questions méthodologiques sont liées aux bases de données d'observation : comment améliorer les modèles grâce aux données ? Comment bien réaliser les changements d'échelles dans les données ? Comment analyser ou assimiler efficacement les données denses, spatialement ou temporellement, qui se multiplient actuellement ?

La quantification des incertitudes est un aspect très important : que ce soit pour des simulations numériques ou pour les méthodes d'assimilation de données, les méthodes d'ensemble se généralisent et permettent un accès à cette quantification des incertitudes. Il faut encourager le développement des approches probabilistes de modélisation. Des questions liées sont celles du choix optimal des ensembles, et de l'exploitation optimale des bases de données de simulation d'ensemble. Concernant les méthodes d'assimilation d'ensemble, des pistes importantes de développement concernent l'amélioration du traitement des non-linéarités, des erreurs non gaussiennes, et du filtrage du bruit d'échantillonnage.

Un point important lié à la quantification des incertitudes et à la représentation des distributions statistiques est celui de la représentation des extrêmes. Il est nécessaire de développer observation et théorie pour mieux les comprendre et les caractériser.

D'un point de vue institutionnel, il faut valoriser le statut des grands modèles numériques, outils communautaires lourds, qui sont à considérer au même titre que de grands instruments ou systèmes d'observation. Cela s'applique au développement de ces modèles (contenu physique, schémas numériques, performances informatiques) et à leur maintenance.

Approches méthodologiques en lien avec la télédétection spatiale

- développer et approfondir les méthodes optiques/micro-ondes et gravitationnelles visant à quantifier et à réduire les incertitudes sur les produits géophysiques dérivés par satellite ;
- favoriser le développement de nouvelles techniques pour approfondir l'exploitation des données spatiales par synergie entre plusieurs capteurs satellite, mais également l'utilisation conjointe de capteurs spatiaux, mesures *in situ*, réseaux de surface et mesures aéroportées ;
- poursuivre des recherches sur les algorithmes d'inversion des données satellite (veille technologique à assurer) en stimulant un rapprochement entre les communautés PNTS et LEFE-MANU par le biais de journées d'échanges sur les méthodologies et techniques d'analyse (atelier) ou de projets communs. Il est nécessaire également d'adapter, voire de repenser, les algorithmes d'inversion pour traiter simultanément de grands jeux de données (« big data » et « data mining ») dans l'optique d'applications « temps réel » ;
- poursuivre et approfondir la modélisation du transfert radiatif (p. ex. accroître la rapidité des modèles, réaliser des exercices d'intercomparaison de codes de calculs, générer des scènes nuageuses et d'interfaces y compris en 3D) pour la préparation ou l'exploitation des missions spatiales en cours ou à venir ;
- favoriser le développement de méthodologies visant à observer ou modéliser les structures 3D du système terrestre (enveloppes superficielles) ;
- assurer une implémentation plus rapide d'algorithmes opérationnels d'inversion validés dans les chaînes de traitement de données satellite en favorisant le rapprochement entre les scientifiques (développeurs d'algorithmes), les pôles thématiques nationaux actuels (en comblant le retard du pôle de données « océan ») et les plateformes de technologies de l'information (calcul scientifique et moyens informatiques) disponibles au CNRS-INSU, tout en recherchant une harmonisation de ces compétences avec celles de certaines PME innovantes. Dans ce contexte, les PME sont à la fois des intervenants incontournables du monde scientifique et des interlocuteurs privilégiés des agences spatiales (CNES, ESA) et publiques (Union européenne, etc.) ;
- améliorer l'observation spatiale du couvert de glace aux hautes latitudes et la représentation du couplage banquise-océan à haute fréquence ainsi que du forçage atmosphérique au travers de l'observation de la banquise.

■ S'appropriier les nouvelles données / nouveaux produits : nouvelles missions spatiales / produits opérationnels

Les nouvelles missions spatiales (SWOT, 2020 ; IASI-NG, 2021 ;

EarthCARE, 2018 ; SMOS, ADM/Aeolus, 2017 ; Microcarb, 2020 ; Merlin, 2021 ; OCAPI) et l'accès à de nouvelles données satellite ou *in situ* y compris celles dérivant de l'opérationnel (p. ex. Copernicus, Mercator Océan, nouvelles réanalyses météorologiques fournies par les centres opérationnels comme l'ECMWF) représentent une opportunité dont il faudra tirer profit. Les données SWOT permettront d'aborder les processus aux très fines échelles océaniques. Elles serviront à valider les simulations haute résolution des modèles océaniques et des modèles couplés. Elles permettront également d'analyser l'effet de ces fines échelles océaniques sur la variabilité climatique. De même, les mesures de salinité de surface avec des missions telles que SMOS permettent de revisiter les interactions air-mer. En ce qui concerne l'atmosphère, dans la continuité des satellites A-Train, la mission EarthCARE devrait permettre d'améliorer notre compréhension des processus faisant intervenir les nuages, les aérosols et le rayonnement grâce à de nouveaux instruments de télédétection lidar et radar, et le lidar vent ADM/Aeolus permettra de mieux contraindre la dynamique atmosphérique. Les données associées pourront permettre d'améliorer les paramétrisations physiques des modèles comme la microphysique des nuages ou les processus de transport d'énergie. Avec la mission IASI-NG, la collecte des données de la série des instruments IASI va se poursuivre, permettant de disposer de plus de 30 ans de données pour les paramètres physiques et chimiques de l'atmosphère, ce qui est essentiel pour le suivi de l'évolution du climat. Avec une résolution spectrale et un pouvoir radiométrique améliorés d'un facteur 2, la série des IASI-NG va permettre également de détecter de nouvelles espèces chimiques et de sonder plus proche de la surface ouvrant la voie à de nouvelles recherches notamment en matière de qualité de l'air.

Enfin, avec l'arrivée des nouvelles missions dédiées à l'observation des gaz à effet de serre, Microcarb (CO₂) et MERLIN (CH₄), permettront à de nombreuses activités de recherche de se développer autour de la spectroscopie, du transfert radiatif, mais également de la validation avec les réseaux sol et les autres missions internationales et de l'assimilation pour l'inversion des flux de surface.

Les perspectives d'observations satellite à très haute résolution (p.e. SWOT, OCAPI) posent le défi de l'utilisation des observations multi-capteurs pour tirer des informations sur les très petites échelles, et le besoin de zones d'études communes spatial/*in situ* avec un renforcement de la synergie de ces deux types d'approches, bénéficiant à la fois à la calibration des capteurs et à la biogéochimie qui pourra tirer parti au mieux de ces informations multi-capteurs.



Structuration et financement de la recherche aux niveaux national et international

Les objets (océan, atmosphère, cryosphère) étudiés par la communauté OA sont de très grande dimension et nécessitent que la communauté soit bien organisée, au plan national comme international. Il apparaît essentiel de mettre en place d'une part une programmation partagée par la communauté et d'autre part des programmes nationaux en soutien à cette programmation. La structuration de la communauté permet d'être force de proposition pour les affichages nationaux, mais aussi dans les programmes européens et internationaux, et de prendre des leaderships sur ses points forts. L'interdisciplinarité est également une nécessité en OA. Par ailleurs, l'utilisation de gros moyens d'observation et de modélisation est souvent incontournable. Dans ce contexte, la réflexion prospective menée tous les cinq ans est un temps fort, car reposant pour une large part sur l'expression de la communauté OA. Cette prospective est aussi en excellente adéquation avec celles des grands programmes internationaux (Future Earth, WCRP) car de nombreux chercheurs sont présents dans ces instances. Toutefois, la déclinaison de cette prospective en termes de priorités d'actions tant au niveau national qu'europpéen est limitée par la nature et la complexité de la structuration et du financement de la recherche au niveau national et international.

En 2006, avec la création des Alliances, en particulier AllEnvi en ce qui concerne OA, le monde de la recherche a connu une grande révolution qui a fortement modifié la position du chercheur et des laboratoires au sein du paysage national. Les Alliances, par leur mode de fonctionnement et leur rôle dans la programmation de l'ANR, ont contribué à éloigner les lieux de définition des priorités par la communauté recherche des lieux de définition des priorités de financement. La consultation de la communauté pour la Stratégie Nationale de la Recherche a été trop rapidement menée au regard de ce qui est possible pour la communauté en matière de réactivité. Par ailleurs l'alignement de la programmation de l'ANR sur le cadre européen général du programme H2020 réduit davantage la possibilité de soutenir une partie des priorités de recherche définies par OA.

Les modalités historiques de financement de la recherche du domaine OA sont aujourd'hui remises en question par la programmation de l'ANR et de H2020, mais également par

l'émergence des politiques de recherche « de site » risquant de favoriser les approches locales au détriment des approches nationales, voire internationales

Dans ce contexte peu favorable, les recommandations suivantes émergent.

■ Réaffirmer le rôle des équipes et laboratoires

L'équipe et le laboratoire doivent rester la base de l'organisation pour la mise en œuvre des activités de recherche. L'équipe et le laboratoire doivent se définir autour de questionnements scientifiques et techniques, de thèmes, d'outils, de finalités fondamentales ou appliquées, communs et structurants. Cette organisation doit permettre d'assurer le maintien de métiers et de compétences associés à ces éléments structurants communs, et le soutien aux projets et aux plateformes constitués autour de questionnements scientifiques cohérents. Une marge de manœuvre financière doit être retrouvée afin de pouvoir réellement impulser une politique scientifique de laboratoire et d'équipe.

Les structures fédératives (OSU, fédérations de recherche, UFR) doivent être au service des unités et être interfacées avec elles. Au-delà des aspects de mutualisation qui pourraient permettre de dégager des ressources plus importantes (financières ou humaines, mais nécessitent un travail de fond associant les agents), ces structures fédératives doivent développer des synergies inter ou pluridisciplinaires. Elles constituent une porte d'entrée privilégiée vers l'université et les organismes/établissements aux échelles locale à régionale. Enfin, elles apportent plus de visibilité, tant au niveau de la politique scientifique que des évolutions de carrière potentielles pour les personnels.

La structuration en grosses unités pluridisciplinaires peut contribuer à gagner de la visibilité aux niveaux local et régional, mais cela ne doit pas se faire en dehors du cadre général décrit au premier paragraphe. Par ailleurs, pour que cette visibilité soit effective, il est nécessaire que ces unités ainsi que les structures fédératives intègrent des représentants dans les bonnes instances locales, régionales et nationales.

■ Conserver la maîtrise d'outils permettant de mettre en œuvre une partie de la prospective OA

Les programmes et autres outils nationaux pilotés par OA sont essentiels pour une mise en œuvre directe de la prospective. Dans ce contexte, les chantiers intégrés régionaux présentent aussi un fort potentiel notamment par leur caractère pluridisciplinaire. L'ensemble de ces outils ne peut jouer pleinement son rôle que si les budgets qui les alimentent sont à la hauteur des objectifs fixés. Le budget du programme LEFE, qui est un des outils OA essentiel à la mise en œuvre de la prospective, a subi une baisse régulière depuis 2008 due à la combinaison de plusieurs facteurs internes et externes au CNRS-INSU. Il a atteint un seuil d'autant plus critique que la fin du chantier MISTRALS en 2020 implique que les projets de recherche ayant pour cadre la Méditerranée réintègrent l'appel d'offres LEFE. Le budget LEFE doit donc régulièrement et significativement augmenter afin de retrouver en 2022 le niveau de 2008.

Par ailleurs, l'ensemble des moyens nécessaires à la réalisation d'un projet de recherche doit être attribué au travers d'un guichet unique impliquant de mieux phaser dans le temps les opérations relatives aux appels d'offres, à leur évaluation et aux prises de décision.

■ Être plus performant dans l'utilisation du système national et européen tel qu'il existe

Cet objectif implique :

- Au niveau national, de renforcer les échanges entre les représentants des organismes siégeant dans les instances (AllEnvi et GT, ANR) et les chercheurs eux-mêmes ;
- De revendiquer une plus grande représentation du CNRS dans AllEnvi ;
- De revendiquer une plus grande représentation des organismes travaillant sur les objets OA dans AllEnvi (en particulier du CNRS) ;
- De renforcer la visibilité des soutiens nationaux dans les montages de projets européens. Dans ce cadre, la pérennité des points de contact sur la durée d'un appel d'offres est essentielle ;
- De mieux utiliser les possibilités offertes par l'ANR pour la constitution de réseaux de réflexion au niveau européen ;
- De favoriser au niveau national l'insertion de nouveaux partenaires au sein de consortiums existants lors de la réponse aux appels d'offres européens ;
- De renforcer les échanges entre lauréats des ERC et les potentiels et de tirer bénéfice des nouvelles opportunités présentes à l'ANR pour renforcer les chances de succès des projets prometteurs.



Développement instrumental

■ État des lieux

L'observation du système Terre, la réalisation de campagnes de terrain ambitieuses, le développement d'expériences de laboratoire novatrices exigent un arsenal expérimental performant. Le développement de nouveaux capteurs et porteurs est essentiel pour rester en pointe sur les questionnements scientifiques, en documentant plus précisément et plus exhaustivement les phénomènes étudiés. Il est aussi important de maintenir des capacités de gestion et de déploiement des parcs d'instruments et de continuer à développer des dispositifs instrumentaux reposant sur des technologies standard, sans innovation particulière, mais fiables et nécessitant peu de maintenance.

Les unités de recherche sont le lieu privilégié du développement instrumental. Les développeurs et les utilisateurs y nouent des liens cruciaux qui doivent être préservés. Au-delà, la Division Technique (DT) du CNRS-INSU a un rôle d'accompagnement essentiel. Elle apporte un support technique de haut niveau et diversifié dépassant les capacités des laboratoires. En tant que structure communautaire, elle permet de pallier en partie les déficits croissants et inquiétants en personnel technique de certaines unités. Cela fait d'elle un des acteurs majeurs du développement technologique comme en attestent divers projets récents : bouées multi-paramètres en Arctique IAOS, systèmes de cal/val pour satellites altimétriques, ligne de mouillage instrumentée MEUST...

■ Avancées majeures depuis la dernière prospective

La miniaturisation des instruments est une tendance nette. Elle donne accès à des couvertures spatio-temporelles jusqu'ici inaccessibles (nouveaux domaines de mesure, réseaux denses de mini-capteurs autonomes...) et elle tire parti d'évolutions technologiques majeures (en électronique, informatique et robotique par exemple).

Pour les sciences de l'atmosphère et le domaine océanique côtier, l'émergence des drones instrumentés autonomes (en complément des avions et des ballons) fait partie des acquis récents. Profitant de la miniaturisation des capteurs et du développement des systèmes d'autopilote, ils offrent de nouvelles perspectives pour l'observation.

Dans le domaine océanique, le quinquennat a vu des avancées substantielles dans les capteurs *in situ* pour les mesures d'éléments chimiques et nutriments dissous, avec en particulier un effet d'entraînement lié aux observatoires des grands fonds comme EMSO.

L'étude de la cryosphère a aussi bénéficié de progrès instrumentaux majeurs, avec le développement des stations autonomes et de l'instrumentation associée pour l'observation de la neige, de moyens de mesures *in situ* et en profondeur (surface spécifique des grains de neige, bouées IAOS en Arctique, invention de la sonde Subglacier pour analyser *in situ* la composition géochimique de la glace profonde, mais aussi dans les océans).

Dans le spatial, de nouvelles mesures sont ou seront prochainement accessibles (humidité du sol avec SMOS, concentrations en différents gaz réglementés avec IASI, vent et aérosols avec les futures missions Aeolus et Earth-Care, CH₄ avec Merlin...), grâce à des missions dans lesquelles la communauté française a pu se positionner avantageusement par les développements préalables réalisés dans les laboratoires.

■ Perspectives et recommandations

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 » (plus performants, miniaturisés, « intelligents », autonomes, communicants), leur adaptation sur des porteurs poly-instrumentés et leur mise en réseau (réseau Argo...). Il faudra aussi examiner les possibilités offertes par les objets connectés dont certains sont déjà réunis en réseau et tirer le meilleur parti des réseaux opérationnels existant (par exemple celui de Météo-France) en facilitant l'accès à leurs données.

Concernant les porteurs, les plateformes mobiles autonomes instrumentées sont des moyens très performants dans nos domaines pour accéder à la variabilité spatiale de nos différents milieux d'étude. Déjà aujourd'hui, que ce soit dans l'air ou sur l'océan côtier avec les drones (mutualisés via l'UMS SAFIRE pour les plus gros), sur ou sous les océans avec les gliders, AUV et ROV, des projets sont opérationnels et une dynamique se met en place. Une piste pour développer de nouvelles plateformes serait d'organiser des échanges avec les laboratoires de robotique du CNRS. Concernant les drones, il est essentiel de travailler sur la miniaturisation des instruments et sur l'augmentation de l'autonomie énergétique afin de bénéficier des potentialités très prometteuses de ce type de plateforme instrumentée.

Le suivi des évolutions climatiques nécessite un soin particulier de calibration et d'intercomparaison des capteurs afin de disposer de séries comparables à la fois dans le temps et dans l'espace. Il doit faire l'objet d'un effort particulier avec notamment la jouvence d'instruments impliqués dans l'acquisition de longues séries climatiques.

Des défis technologiques majeurs et innovants sont à relever de façon générale pour atteindre les objectifs d'étude de notre communauté.

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* afin d'aboutir à terme à leur intégration au sein des plateformes mobiles ;
- le développement des technologies prometteuses sur l'état physique de l'atmosphère, comme les émetteurs à état solide ou les antennes synthétiques pour les radars, ou de nouveaux capteurs aéroportés pour la microphysique des nuages et les aérosols ;
- le développement de nouveaux instruments permettant la mesure simultanée de la nature et des concentrations (voire des rapports isotopiques) d'espèces chimiques et de l'état physique de l'atmosphère (y compris dans des conditions interdites aux instruments actuels, par exemple pour des vents ou des humidités très élevés) ;
- la poursuite du développement de nouvelles techniques très sensibles de spectroscopie optique (CRDS, CEAS...) ;
- 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.

Pour l'océanographie, il s'agira notamment :

- de développer des échantillonneurs permettant de concentrer des microorganismes sur des membranes, généraliser l'utilisation de capteurs de pollution locale à base de puces ARN/ADN (réponses génétiques d'organismes modèles) ou détecter les modifications de peuplements d'espèces par le suivi de groupes déterminés, même s'ils sont présents sous forme de trace ;
- de développer des capteurs *in situ* (avec la DT ou des industriels) et miniaturiser des capteurs existants à déployer sur les observatoires sous-marins et/ou des vecteurs comme les gliders / AUV / animaux : capteurs (électro-)chimiques de mesure des concentrations en nutriments dissous (nitrates, silicate et phosphate), analyseurs chimiques des éléments en trace et des isotopes, spectromètres de masse pour caractéristiques chimiques, capteurs révélateurs d'activités biologiques *in situ* ;
- de développer de nouvelles générations d'appareils optiques

et de logiciels de traitement d'images performants et adaptés, pour le comptage des particules inertes et vivantes... ;

- d'adapter/moderniser des capteurs sur des flotteurs / profileurs (chlorophylle, sels nutritifs, phytoplancton, conductivité, oxygène, pCO₂...) ;
- de développer des capteurs capables d'opérer dans les milieux océaniques profonds, y compris à haute fréquence.

Pour la cryosphère, on visera à :

- poursuivre les développements de capteurs autonomes pour la spatialisation des observations sur la neige comme sur la glace (robotique robuste et à faible coût énergétique) ;
- développer l'instrumentation pour l'acquisition de données *in situ* aussi bien au travers de la colonne de neige/névé que sur les grandes épaisseurs de glace ou directement sous les plateformes de glace flottante, que ce soit pour des informations d'ordre physique ou chimique.

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... ;
- de développer les techniques d'observation de la SST et de la salinité depuis l'espace par micro-ondes ;
- de 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) ;
- d'accompagner la préparation des nouvelles missions spatiales, en particulier IASI-NG sur METOP, 3MI sur EPS-SG et les futures missions lancées dans les années qui viennent (Aeolus et Earth-Care à l'ESA pour le vent et les aérosols, MERLIN pour le CH₄...) ;
- de continuer à réfléchir aux moyens de mesures possibles de la qualité de l'air et de la pollution à partir de plateformes géostationnaires ;
- de 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.

Interdisciplinarité

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 inter-organismes bien doté 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.

Si l'appel d'offres de la mission pour l'interdisciplinarité du CNRS a offert un premier cadre programmatique à cette fin, les montants disponibles relativement faibles et les délais d'utilisation de ces budgets ne favorisent pas pour autant des développements conséquents. Plus généralement, la disparition de l'appel d'offres « mi-lourds » du CNRS-INSU pénalise les développeurs, qui trouvent désormais difficilement des guichets adaptés à l'instrumentation coûteuse.

Mutualisation

Les techniques instrumentales actuelles nécessitent de nombreux développements instrumentaux et mathématiques qui gagneraient à être mutualisés *via* par exemple des échanges de code.

Gestion des petites séries

La production de séries d'instruments ou d'équipements visant un déploiement large ou des déploiements analogues multiples mais en petites séries (donc probablement peu rentable d'un point de vue économique) est une réelle difficulté. Les processus de production de telles séries, même en quantité réduite, à partir de prototypes réalisés par nos unités, ne relèvent pas des prérogatives de nos unités, mais plutôt de transfert technologique ou de sous-traitance pour lesquels nos équipes sont mal préparées. Il serait de ce fait nécessaire d'encourager les équipes instrumentalistes à acquérir la compétence requise pour gérer de telles sous-traitances ou processus de valorisation. Il sera également nécessaire de mener une analyse des stratégies les plus adaptées, en fonction des cas, pour produire de telles séries, notamment pour identifier les étapes de conception, réalisation, tests et étalonnages devant rester dans les laboratoires, ou à la DT.

Positionnement de la DT et soutien humain au développement instrumental

Il paraît nécessaire de mener une réflexion (i) sur le niveau d'implication et la durée de soutien de la DT dans le montage

des projets, (ii) sur l'équilibre entre les compétences disponibles ou à développer à la DT d'une part et dans les unités d'autre part, (iii) sur le niveau de technicité demandé à la DT (R&D, conception, fabrication, mise en œuvre) et (iv) sur le recours éventuel à la sous-traitance. La façon dont la DT peut être associée efficacement à de gros projets provenant de financements externes (ANR, Europe, EquipEx...) nécessite également un positionnement clair. L'émergence des EquipEx a par exemple conduit à créer de nouveaux instruments dont la gestion, l'amélioration, la maintenance à moyen terme ne sont pas nécessairement assurées.

Il est nécessaire de maintenir une bonne reconnaissance de l'activité de développement technologique lors de l'évaluation des chercheurs et des unités, ainsi que le recrutement de chercheurs spécialisés dans les développements expérimentaux. Notons que l'accroissement de l'instrumentation automatisée ne signifie pas une diminution des besoins en ressources humaines.

Plus généralement, les recrutements d'ingénieurs et de techniciens dans les métiers liés au développement instrumental doivent être préservés. Ainsi la perte en ligne générée par la gestion de projets instrumentaux *via* des personnels CDD pose un problème majeur à nos communautés aujourd'hui.

Investissement, Maintenance et Jouvence

Les nouveaux instruments ont un coût de conception ou d'achat, puis un coût de maintenance. Il est nécessaire de prévoir environ 10 % du coût de l'instrument chaque année pour sa maintenance et sa jouvence. La jouvence des instruments ne doit pas se limiter aux SNO mais concerner aussi les instruments dédiés aux campagnes de terrain (p.ex. instrumentation embarquée sur la flotte aéroportée, instrumentations du Parc Océanographique National, flotte glider) et aux instruments des laboratoires.

La communauté doit identifier les moyens mi-lourds qu'il faut absolument préserver dans le temps pour sécuriser les budgets nécessaires en évitant les doublons. Par exemple, le projet Réseau Géochimique et Expérimental Français (REGEF) porté par le CNES-INSU, dans l'optique notamment de la création d'une Infrastructure de Recherche (IR au sens du CNRS) et d'un soutien européen, constitue un effort intéressant d'identification et de gestion des instruments en lien avec la géochimie au niveau OA.

■ Division Technique du CNRS-INSU

La Division technique (DT) du CNRS-INSU regroupe une cinquantaine d'agents permanents de niveaux ingénieur, technicien ou administratif, ainsi qu'une cinquantaine de marins en CDI.

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 de stations ;
- la mise à disposition pour les 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 du parc national de gliders océaniques ;
- le développement et la maintenance de nombreux instruments nationaux (LNG pour RALI, AVIRAD, 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 (12 IT permanents et un marin). Gestion du Parc national d'instrumentation océanographique hauturier et côtier en soutien aux demandes de campagnes à la mer des laboratoires de la communauté scientifique du CNRS. Soutien aux laboratoires pour le développement d'instruments et pour les grands équipements : EquipEx IAOS (bouées instrumentées), EquipEx CLIMCOR (systèmes de carottage et refonte du navire océanographique le Marion Dufresne), FOAM (cal/val satellites altimétriques), cellule océanique du C2FN.
- La Seyne-sur-Mer (16 IT permanents et 2 marins de l'armement) : parc national de gliders, équipement fond de mer (lien avec le CNRS-IN2P3 dans le cadre d'ANTARES et de MEUST), instrumentation bateaux, cellule continentale du C2FN, armement de la flotte CNRS.
- Meudon (24 IT permanents) : soutien aux laboratoires pour le développement d'instruments aéroportés (lidar LNG, radar KUROK, ...), embarqués sous ballon (spectromètre par diode laser picoSDLA, ANR TroPico, campagnes CNES STRATEOLE-2, ...), spatiaux (missions Exomars et JUICE) et océanographiques (EquipEx IAOS, capteurs de $p\text{CO}_2$, mesure de flux, ANR OPTIMISM, ...), EquipEx RESIF, parcs géophysiques mobiles.



Calcul scientifique et grandes masses de données

Un des objectifs de la communauté scientifique Océan Atmosphère est d'améliorer sa compréhension et sa capacité à prédire l'évolution du fonctionnement de l'océan, de l'atmosphère et de leurs interactions, de l'échelle globale ou régionale à locale. Ses domaines d'études couvrent l'évolution du climat et ses impacts, dans lesquels ces systèmes jouent un rôle déterminant à toutes les échelles de temps. Les avancées scientifiques reposent sur différents outils : mesures *in situ*, observations satellite, modélisation, méthodes mathématiques et numériques.

■ État des lieux

La surveillance de l'environnement s'appuie sur des systèmes d'observation en croissance (en nombre et en diversité). La résolution spatiale, temporelle et spectrale des capteurs spatiaux d'observation de la Terre est en forte évolution. Les modèles ont amorcé une profonde évolution vers la résolution de processus physiques plus complexes, associés à des échelles spatio-temporelles de plus en plus fines. Les différents moyens d'observation (*in situ* et satellite) et de modélisation sont de plus en plus souvent utilisés en synergie afin d'obtenir une vision plus complète et intégrée de l'évolution des systèmes. Cette approche permet aussi l'émergence de nouvelles applications : prévision climatique, évaluation des risques naturels et sociétaux, gestion des ressources naturelles, etc.

■ Évolutions depuis la dernière prospective

Lors de la dernière prospective, l'accent a été mis sur les besoins en calcul intensif et stockage de la communauté climatique, notamment en matière d'adéquation des machines aux besoins. La mise en place d'une prospective continue en calcul intensif, une structuration des centres de calcul, ainsi que le renforcement du rôle des comités d'usagers dans la définition des moyens de calcul étaient également préconisés. Une évolution importante et rapide des unités de calcul à vocation de recherche a eu lieu ces dernières années, avec une structuration des ressources en calcul haute performance en trois niveaux : le projet PRACE à l'échelle européenne, des centres nationaux (GENCI) et des mésocentres régionaux.

Les allocations PRACE permettent de réaliser des simulations frontière nécessitant de très grosses ressources. Il s'agit le plus souvent d'expériences uniques dont le rendu est parfois minoré par la difficulté d'exploiter des flux de données relevant du « big data ». Au niveau national, malgré les avancées et efforts conséquents consentis, on constate que les capacités et puissances de calcul se sont détériorées ces trois dernières années, en comparaison avec d'autres pays européens. En 2012, Curie, la machine la plus performante du GENCI, figurait dans le « top 10 » des classements internationaux ; en 2016, Occigen, la dernière acquisition du GENCI, n'apparaît qu'au rang 64. Durant la même période, la communauté académique

allemande a su maintenir au plus haut niveau ses capacités de calcul en affichant plusieurs machines dans les 20 premières places. Sur l'ensemble de la période 2010-2016, les performances des machines du « top 500 » ont augmenté d'un facteur 15 alors que les heures attribuées aux équipes françaises ont augmenté au mieux d'un facteur 7. Cette situation est particulièrement pénalisante pour la communauté climat et constitue un frein à sa participation aux projets d'intercomparaison internationaux tels que CMIP ou CORDEX. (À titre indicatif, CMIP6 nécessitera dix fois plus de ressources calcul que CMIP5 et 7 fois plus de stockage).

Les codes de calcul de modélisation de l'océan et de l'atmosphère, les méthodes d'assimilation de données et d'analyse évoluent en permanence pour tirer profit de l'évolution rapide des architectures des machines. Cette dernière impose aussi en retour de fortes contraintes sur la refonte des codes, nécessitant un effort conséquent de la communauté. La formation est donc indispensable pour assurer la diffusion des connaissances sur les méthodes et outils numériques, ainsi que le partage d'expertise et les interactions entre les numériciens/physiciens développant les modèles et les spécialistes HPC. Ces aspects peuvent maintenant être pris en charge par la Maison de la simulation (créé en 2011) et les structures similaires, et s'organiser autour des mésocentres régionaux.

Parallèlement, le volume des données issues des simulations et des observations a explosé au cours des dernières années, mettant une grosse pression sur les moyens de stockage et soulevant des questions spécifiques à leur traitement, analyse et distribution. Cette pression augmentera encore fortement dans les années à venir (par exemple avec l'arrivée des missions Sentinel du programme Copernicus, commençant à fournir plusieurs To/jour avec des observations ayant une résolution fortement accrue). Disposer d'une politique de gestion (cycles de vie, sécurité, documentation), des infrastructures à la bonne échelle (nationale et mésocentres) et des outils mathématiques et numériques permettant la mise à disposition et l'exploitation (visualisation et analyse) de ces données d'observation ou de modèles, complexes et volumineuses (big data) est devenu aujourd'hui un enjeu stratégique majeur. Certains outils existent déjà, comme le portail d'accès aux projections climatiques DRIAS et la plateforme d'analyse de l'IPSL. Pour les observations, des

mésocentres de proximité se développent avec une capacité de calcul autonome et des volumes de stockage importants.

Sur tous les sujets, de nouvelles méthodes de travail émergent dans la communauté OA, qui, en combinant plusieurs sources d'information (multi-capteurs pour les données satellite, multi-échelles, « multi-proxys » pour le climat...), offrent des visions plus intégrées des systèmes et une exploitation optimale des sources d'information individuelles. En atmosphère, le développement des centres de données Espri et Icare et le service de données SEDOO ont permis de répondre, au moins en partie, à ce besoin. En océanographie, il s'est structuré autour des services opérationnels, avec les centres de données AVISO et Coriolis. Il reste cependant de nombreuses observations qui se trouvent encore dans des bases de données locales. La construction des pôles de données (AERIS pour l'atmosphère, ODATIS pour l'océan) et leur insertion dans le pôle du système Terre doivent permettre l'accès à toutes les données existantes et leur intercomparaison. Cela favorisera la création de produits à valeur ajoutée combinant plusieurs sources d'information. C'est aussi un enjeu majeur de visibilité au niveau européen de nos services d'observation et infrastructures de recherche nationales, y compris pour leur insertion dans les services Copernicus (MYOcean, CAMS, C3S).

■ Recommandations

Les moyens de calcul haute performance, de stockage et la capacité à traiter, analyser et distribuer les gros jeux de données conditionnent aujourd'hui fortement les avancées scientifiques de la communauté OA ainsi que ses reconnaissance et visibilité à l'échelle européenne et internationale. Ils sont aussi des enjeux en termes de retombées socio-économiques. En accord avec le travail de prospective mené par le CS du CNRS-INSU sur ce sujet, la communauté OA s'accorde aujourd'hui sur les besoins majeurs suivants :

- maintenir la granularité des différents niveaux de centre de calcul (chacun correspondant à un besoin bien défini), avec un renforcement et une mise à niveau de leurs moyens HPC et en veillant à ce qu'ils soient associés à des moyens de stockage et des environnements numériques (outils communautaires d'analyse des données, de visualisation, bibliothèques de

calcul) permettant l'exploitation scientifique à proximité de la donnée. Les comités d'utilisateurs doivent être renforcés ;

- veiller à ce que les moyens du GENCI demeurent compétitifs au niveau international ;
- mieux anticiper l'évolution des besoins spécifiques à la communauté climat et mieux l'accompagner dans sa quête de ressources (en soutenant par exemple l'initiative CLIMERI-France).

Sur la question des pôles de données et leur lien avec les centres de calcul :

- continuer la structuration et le développement des pôles de données et de services ODATIS et AERIS et leur intégration dans la future IR du système Terre, en favorisant la co-localisation des données et en veillant à construire les liens forts entre ces pôles et les services à proximité des utilisateurs (SNO et mésocentres hébergés par les OSU). Il faut également développer les services adossés aux pôles de données en lien étroit avec les utilisateurs ;
- insérer le développement des pôles de données dans les infrastructures européennes ;
- développer le lien entre les pôles de données et les centres de calcul. Favoriser l'accès aux données de simulation au niveau national et européen (en se servant par exemple des projets ENVRI+ et infrastructures de recherche).

Et enfin sur les aspects formation :

- favoriser et consolider les échanges entre les communautés Océan Atmosphère, Informatique, Maths appliquées et Science des données afin de diffuser l'expertise entre ces disciplines, *via* par exemple l'organisation d'ateliers, d'écoles d'été ou d'AO dédiés ;
- encourager et investir sur la formation sur les moyens HPC et la gestion de la donnée, et recruter des experts sur les questions HPC et de stockage, gestion, analyse et visualisation de grands volumes d'information ;
- veiller à ce qu'il y ait une vraie reconnaissance par les commissions spécialisées et paritaires (CNRS, IRD, Universités...) de l'investissement des personnels (ITA, EC et chercheurs) dans des tâches d'intérêt collectif dans le domaine du calcul scientifique et du big data, afin d'encourager et pérenniser les efforts et compétences sur ces sujets.

■ Copernicus : La Terre vue par l'Europe

Le programme européen d'observation de la Terre Copernicus est entré dans sa phase de maturité et continue de se déployer. Quatre services Copernicus de surveillance des milieux environnementaux et d'aide à la gestion des urgences sont maintenant pleinement opérationnels et deux services thématiques (changement climatique et sécurité) sont en développement, alors même que les cinq premiers exemplaires des six séries de satellites Sentinel (Sentinel 1A, 1B, 2A, 2B et 3A) ont été lancés avec succès.

Copernicus s'appuie sur trois composantes :

- la composante spatiale coordonnée par l'Agence spatiale européenne ;
- la composante *in situ* coordonnée par l'Agence européenne pour l'environnement ;
- la composante des services à l'utilisateur, coordonnée directement par la Commission européenne et confiée à des délégataires.

Le cadre financier pluriannuel de l'Union européenne alloue un montant de 4,3 Mds € courants, pour la période 2014-2020, à Copernicus pour l'ensemble de ses composantes, assurant la pérennité du programme au moins jusqu'en 2020.

Service de surveillance du milieu marin (*Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, CMEMS : <http://marine.copernicus.eu>). Ce service délégué à la société civile Mercator Océan est pleinement opérationnel depuis 2015. Il est le fruit d'investissements importants consentis par la communauté océanographique française, dont en particulier la recherche. Il fournit des informations de référence régulières et systématiques sur l'état physique de l'océan en profondeur (température, salinité, courants), ainsi qu'en surface (niveau de la mer, vent de surface, glaces de mer et variables biogéochimiques). Le service compte plusieurs milliers d'abonnés (la moitié issue du monde de la recherche), et leur nombre croît constamment.

Service de surveillance de l'atmosphère (*Copernicus Atmosphere Monitoring Service*, CAMS : <http://atmosphere.copernicus.eu>). Ce service, délégué au Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), est pleinement opérationnel depuis juillet 2015. La contribution française est très importante *via* les laboratoires de la communauté ainsi que Météo-France et l'Ineris. Ce service fournit des informations quotidiennes sur la

composition de l'atmosphère mondiale en surveillant et en prévoyant des constituants tels que des gaz à effet de serre, des gaz réactifs et les aérosols. Il effectue également des analyses et des prévisions du rayonnement UV. Le service fournit également des analyses en temps quasi réel, des prévisions à 4 jours, ainsi que des réanalyses de la qualité de l'air en Europe.

Service changement climatique (*Copernicus Climate Change Service*, C3S : <http://climate.copernicus.eu>). Ce service, délégué également au CEPMMT, est en cours de développement. Il vise à répondre aux enjeux environnementaux et sociétaux associés aux changements climatiques induits par l'homme. La phase opérationnelle entrera en service en 2018. Les scientifiques français sont présents pour répondre aux appels d'offres afin de développer ce service et sont en bonne position pour le faire grâce à leur position internationale dans ce domaine. Le service donnera accès à des informations de surveillance et de prévision des changements climatiques et de leurs impacts, et par conséquent, contribuera à soutenir les efforts d'adaptation et d'atténuation. Il vise à devenir un service européen de référence sur le climat s'appuyant à la fois sur l'observation et sur la modélisation. Plusieurs indicateurs (par exemple l'augmentation de la température, l'élévation du niveau de la mer, la fonte des calottes glaciaires, le réchauffement de l'océan) et indices (pour décrire l'évolution du climat et de ses impacts sur de grands secteurs d'activités) climatiques seront disponibles.

Quelle place pour la recherche ?

L'engagement des acteurs de la recherche a permis à la France d'accéder à une place de premier plan dans le programme tant pour la composante spatiale que pour la composante des services. Pour garder cette place, cet effort doit être maintenu, aussi bien pour le prétraitement des données que pour les développements susceptibles de contribuer à l'évolution des services. Ceci passe par une implication forte des pôles de données, en particulier AERIS pour CAMS, en partenariat avec les laboratoires ayant contribué à élaborer et faisant évoluer les services. Pour l'*in situ*, il convient de s'appuyer sur les infrastructures de recherche européennes dans lesquelles la France est bien positionnée et s'appuie de plus en plus sur les pôles de données.

Le programme Copernicus a été et est un élément important de l'excellence de la communauté pour tous les services.

D'autre part, la recherche est elle-même utilisatrice de

Copernicus: elle peut s'appuyer sur la masse de données et d'informations disponibles (1 Poctets tous les 6 mois) à son bénéfice. Le programme Copernicus suit, pour toutes ses informations (produits des services et données des Sentinel), une politique de données libres, ouvertes et gratuites pour tous, sous réserve de conditions de sécurité.

Les points d'accès aux informations Copernicus sont récapitulés sur une page du site internet du programme.

Par ailleurs, la plateforme d'exploitation des produits des Sentinel (PEPS) mise en œuvre par le CNES, constitue un site miroir national pour l'accès aux données Sentinel, facilitant l'accès à ces données pour les utilisateurs français (<https://peps.cnes.fr>).

D'autre part la création de nouveaux services et l'évolution des services actuels nécessitent des efforts de recherche continus.

Les principales sources financières qui contribuent à la recherche Copernicus sont les suivantes :

- le programme Climate Change Initiative de l'ESA qui finance la recherche autour des ECV (variables climatiques essentielles) utilisant le spatial ;
- le volet Espace de H2020 qui soutient la recherche amont sur les nouveaux services et ceux existants ainsi que la recherche sur le traitement des données massives autour de Copernicus ;
- les Défis sociétaux de H2020 peuvent également concerner des thématiques Copernicus ;
- les appels d'offres lancés par les délégataires eux-mêmes : « Service Évolution » (R&D proche du développement des services) par Mercator Océan pour le Service environnement marin ou R&D pour le service atmosphère ou encore les appels du service Climate Change Copernicus Service qui est en cours de construction et lance des AO autour des services climatiques par le CEPMMT ;

- enfin en France, le programme LEFE, les AO du CNES en étroite collaboration avec le TOSCA, notamment pour des thèses, le programme Copernicus MDD du MEEM... ;
- concernant l'innovation, le programme PIAVE pour les applications numériques spatiales et métiers, mais également l'AMI challenge numérique de la DGE.

Recommandations

- améliorer la participation de la recherche aux préparations du User forum de Copernicus pour que les besoins soient portés au niveau européen *via* le MEEM ;
- introduire le côtier et le littoral dans Copernicus, mais cela nécessite une coordination nationale opérante pour que la France y joue un rôle ;
- proposer un soutien logistique (conseil, relecture, aspects légaux et financiers...) et de coordination nationale pour répondre aux appels européens, comme cela existe dans certains pays ;
- pérenniser les personnels clés des laboratoires dans le service CAMS qui ne peut fonctionner sans l'apport de la contribution française ;
- accompagner et coordonner les recherches autour de Copernicus, au niveau du CNRS-INSU. Suivre l'exemple du service marin pour lequel une « stratégie scientifique française » est établie dans le cadre du programme LEFE-GMMC ;
- mettre en place un réseau sur les services climatiques autour de l'IPSL et Météo-France, en liaison avec les autres organismes impliqués, pour bénéficier au mieux des apports du service changement climatique Copernicus (C3S) ;
- utiliser Copernicus pour les rapports sur l'environnement. Une surveillance plus continue de l'environnement au niveau spatial et temporel devrait, en effet, contribuer à une meilleure compréhension des processus et à un meilleur rapportage.



Infrastructures

À l'échelle nationale, différentes infrastructures coexistent, correspondant à différents niveaux d'intégration : les services et moyens nationaux labélisés ou non du CNRS-INSU, les Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement (SOERE ; AllEnvi) ainsi que les Infrastructures de Recherche et les Très Grandes Infrastructures de Recherche (IR et TGIR ; MENESR). Depuis 2011, les Services Nationaux d'Observation (SNO) se sont partiellement structurés en se rassemblant progressivement dans des structures fédératives, les SOERE. En 2015, le cadrage de la feuille de route IR/TGIR du MENESR a fortement incité les SNO à se constituer en ensembles fédératifs plus larges, à caractère national, ayant vocation à être les miroirs français d'infrastructures européennes (ESFRI, I3...). Dans ce nouveau schéma, les ex-SOERE ne subsistent éventuellement qu'en termes de structures internes d'animation scientifique des IR ou TGIR, ou lorsqu'une IR n'existe pas encore.

La communauté OA a été concernée par trois nouvelles infrastructures labélisées :

- l'IR Littorale et Côtière (ILICO, prolongée par l'I3 JERICO NEXT au niveau européen) qui regroupe l'ensemble des SNO et SOERE du domaine, mis en œuvre par le CNRS-INSU, l'Ifremer,

l'IRD, le SHOM, l'IGN ;

- l'IR ACTRIS-France (miroir français de l'ESFRI ACTRIS) qui regroupe les SNO et SOERE atmosphériques hors ICOS (TGIR/SNO préexistante sur les gaz à effet de serre) et IAGOS (IR/SNO préexistante concernant les observations embarquées sur les avions de ligne commerciaux) ;

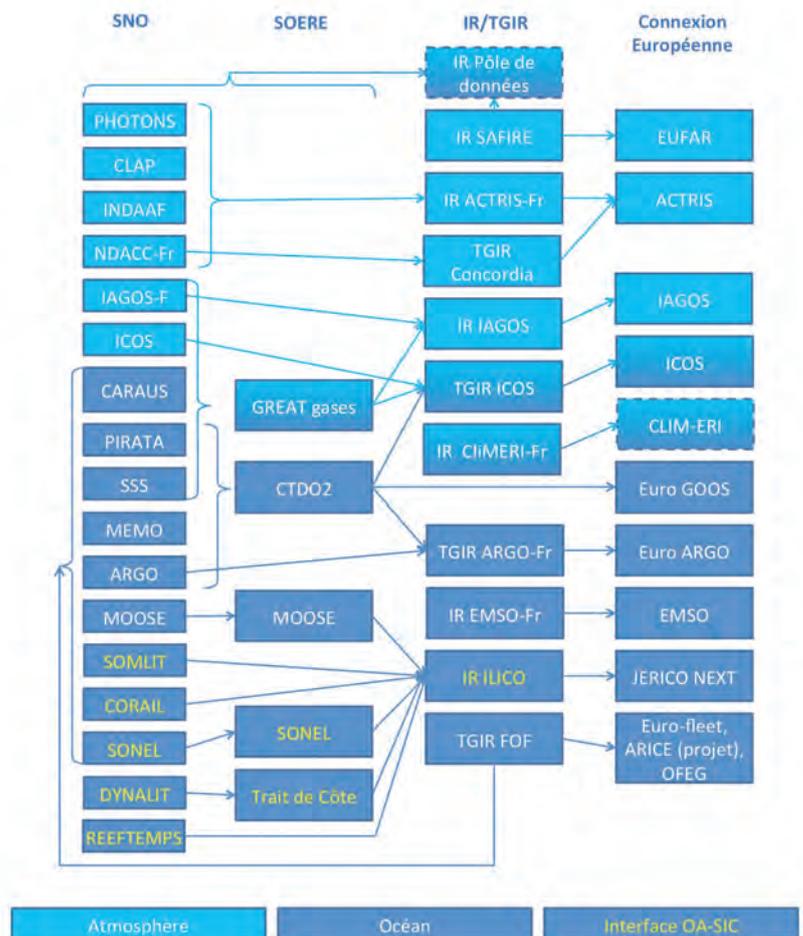
- l'IR CLIMERI-Fr (miroir français d'un possible projet d'ESFRI CLIMERI) qui regroupe les infrastructures et expertises françaises en matière de modélisation climatique.

Ces nouvelles IR, ainsi que les quatre pôles de données et services en observation de la Terre (pôle atmosphère AERIS et pôle océan ODATIS pour le domaine OA) se mettent en place actuellement. La communauté OA est également impliquée dans un projet d'IR visant à rassembler les quatre pôles de données et services.

La communauté OA est aussi impliquée dans les projets préexistants suivants :

- en océanographie hauturière la TGIR Argo (miroir de l'ERIC Euro-Argo), le SOERE CTDO2 qui fédère plusieurs SNO labélisés, l'ensemble étant consolidé au niveau français au travers de la convention de collaboration inter-organismes Coriolis ;

Figure 1. Principaux liens entre SNO/SNI, SOERE, IR/TGIR et leurs connexions européennes pour le domaine Océan Atmosphère



- en sciences de l'atmosphère, la TGIR ICOS (gaz à effet de serre), l'IR IAGOS (gaz réactifs, ozone), le SOERE GREAT-gases (fédérant ICOS et IAGOS) ;
- dans une moindre mesure, l'IR EMSO (observation des fonds océaniques).

La communauté est enfin une grande utilisatrice de la TGIR FOF (Flotte Océanographique Française) et de l'IR SAFIRE (Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement).

Actuellement il n'existe pas d'IR « océan hauturier ». Néanmoins, chaque SNO concernant l'océan hauturier est lié au SOERE CTD-O2 et à la structure inter-organismes Coriolis. La mise en place d'une IR Océan hauturier *in situ* (OHIS), intégrant des SNO actuellement rattachés aux SOERE CTD-O2 ou GREAT-GASES fait l'objet d'une réflexion.

Il convient de mentionner que les SOERE intermédiaires entre les SNO et les IR/TGIR nationales labélisées ont vocation à disparaître en tant que structures labélisées. Seuls devraient subsister les couches SNO (briques de bases), IR/TGIR (niveau national), et le niveau européen ou international. Les crédits des ex-SOERE devraient être gérés et ventilés en interne par les nouvelles IR/TGIR labélisées.

■ Les services et moyens nationaux labélisés du domaine Océan-Atmosphère

• État 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 questions sociétales ou des missions de service public. Par exemple, la communauté scientifique est souvent sollicitée pour évaluer les conséquences à long terme du changement global ou l'effet des perturbations anthropiques, avec l'objectif de prévoir, à l'échelle du siècle, l'évolution et le devenir de la planète Terre et d'évaluer l'impact de certains événements naturels sur la société. Il est ainsi nécessaire de disposer de séries de données de longue durée afin de mieux appréhender le fonctionnement de systèmes naturels complexes. De telles séries sont acquises par le CNRS-INSU et ses partenaires.

Dans ce contexte, le CNRS-INSU labélise des Services

Nationaux d'Observation, le plus souvent organisés en réseau, chacun destiné à la mesure d'un nombre limité de paramètres océaniques ou atmosphériques, ainsi que des Sites Nationaux Instrumentés (SNI) qui regroupent sur un même site une grande variété d'instrumentation de mesures atmosphériques destinées à des analyses sur le long terme. L'importance de la modélisation numérique dans la recherche a également amené le CNRS-INSU à soutenir un nombre restreint de codes numériques à vocation communautaire. Enfin, le CNRS-INSU labélise également des Services Nationaux d'Analyse, des Instruments Nationaux et un centre de traitement et d'archivage des données. Ces services et moyens nationaux sont rassemblés en cinq Actions Nationales d'Observation (ANO) au sein du domaine OA : les SNO de l'atmosphère (AO-ANO-1), les SNO de l'océan (AO-ANO-2), les codes numériques communautaires (AO-ANO-3), les centres de traitement et d'archivage des données (AO-ANO-4) et les sites nationaux instrumentés (AO-ANO-5). Ces différents services peuvent faire l'objet, à la demande du porteur, d'une contractualisation entre les organismes partenaires pour les cas où la gouvernance pourrait être compliquée.

Ces services labélisés sont régulièrement évalués par la Commission Spécialisée Océan Atmosphère (CSOA) qui est une commission inter-organismes coordonnée par le CNRS-INSU. Ceux qui ne remplissent pas, ou plus, le cahier des charges d'un service labélisé sont arrêtés alors que de nouveaux peuvent émerger. Lors de la dernière vague de labélisation (2015) deux SNO et un SNA ont été délabélisés, un SNO et deux SNI ont été nouvellement labélisés, et 21 services ont été re-labélisés dans leur périmètre précédent ou dans un périmètre modifié. Les services actuellement labélisés figurent en annexe.

Ces différents services labélisés par le CNRS-INSU sont mis en œuvre par le CNRS et ses partenaires (Universités, IRD, Météo-France, IGN, CEA, Ifremer, MNHN, etc.), sous la responsabilité des OSU. Le corps des CNAP a été créé en support aux SNO. Dans le domaine OA, ce corps semble sous-dimensionné, la part des CNAP ne représentant que 24 % des chercheurs/enseignants-chercheurs impliqués dans les SNO contre 50 % ou plus en Terre Interne et en Astronomie-Astrophysique. Une réflexion nationale concernant ce corps est en cours au MENESR. Il apparaît ainsi que les SNO fonctionnent grâce à la forte implication des personnels des UMR.

• Recommandations

Personnels impliqués

Il est essentiel qu'au sein des OSU il y ait une forte connexion entre les services, les UMS et les UMR. En particulier, les

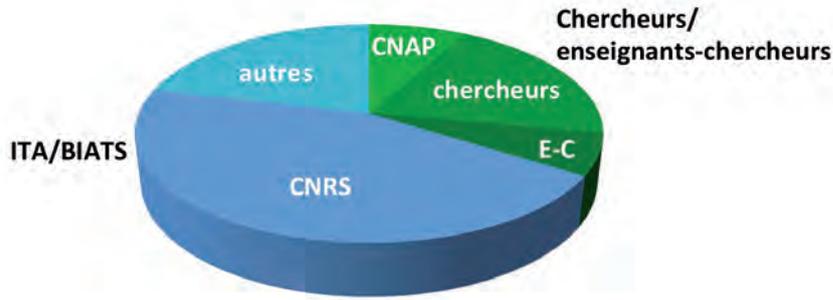


Figure 2. Proportion des personnels impliqués dans les SNO.

services doivent être connectés aux UMR, quelle que soit l'unité (UMS ou UMR) dans laquelle sont les personnels, notamment les personnels techniques et les CNAP. Ceux-ci doivent rester en contact fort avec les chercheurs des UMR afin de suivre les avancées techniques et technologiques, de ne pas être en situation d'isolement, et afin que le travail de routine associé aux services ne conduise pas à une démotivation et une perte d'évolution de carrière.

Structuration des communautés, granularité des services

Actuellement, certains codes numériques, certains types d'analyse ou certains instruments ou parcs instrumentaux sont labélisés en tant que Code Communautaire, Service National d'Analyse ou Instrument National, et d'autres non. Par ailleurs, certaines communautés, chacune regroupée autour d'outils communs (p. ex. radars en météorologie, codes numériques DEPHY, MISSTERRE, COMODO) cherchent à se structurer. La plupart de ces services labélisés le sont à l'échelle individuelle en OA. Une autre granularité peut exister, comme celle des réseaux d'instruments de type RéGEF (Réseau Géochimique et Expérimental Français ; en construction) initiée par le domaine Terre Solide et couvrant largement d'autres domaines dont OA. La prospective n'a pas permis de définir une granularité idéale. Une réflexion devra être mise en place afin de déterminer la bonne définition de ces services en prenant en compte notamment les éléments suivants : 1) un service labélisé doit fournir un service à une communauté qui va au-delà de la communauté qui développe ou maintient le service, 2) la justification d'un service peut-être remise en cause lorsque l'accès à ses outils analytiques se généralise, 3) la vision laboratoire-ressource versus réseau.

■ Très grandes infrastructures de recherche dans lesquelles la communauté Océan-Atmosphère est fortement impliquée

● Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (SAFIRE)

État des lieux

SAFIRE est une Infrastructure de Recherche (MENESR) et une Unité Mixte de Service (Météo-France/CNRS/CNES) créée en 2005 qui opère trois aéronefs instrumentés : un Piper Aztec pour les explorations à l'échelle locale et avec une petite charge utile, un turbopropulseur ATR-42 et un jet Falcon 20 pour les explorations à l'échelle régionale. SAFIRE a trois objectifs principaux :

- acquérir des données à différentes altitudes lors de campagnes coordonnées d'observations pour améliorer nos connaissances sur les processus contrôlant l'évolution de notre environnement (physique et chimie de l'atmosphère, surfaces continentales et océaniques...);
- conduire les campagnes de calibration/validation de nouveaux instruments embarqués sur satellite et des concepts d'instruments préfigurant de futures missions spatiales ;
- participer à des projets de recherche et développement sur la thématique aéronautique.

Parmi les questions scientifiques du domaine OA qui nécessitent de maintenir l'infrastructure SAFIRE au meilleur niveau, on peut citer : comment améliorer notre compréhension des interactions aérosol-nuage-vapeur d'eau ? Comment mieux caractériser les sources et l'évolution de la pollution particulaire ? Comment mieux prévoir les phénomènes météorologiques extrêmes ?

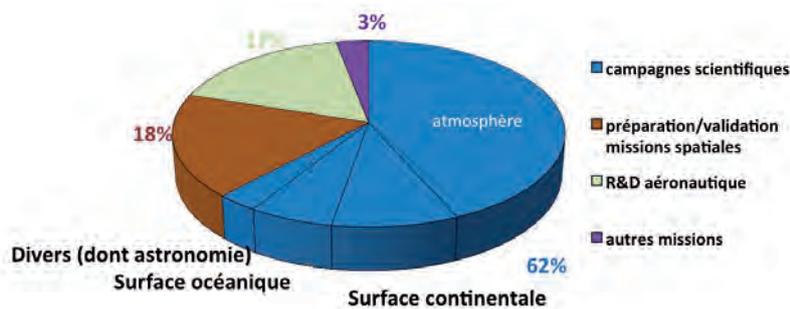


Figure 3. Répartition des heures de vols scientifiques.

Quels sont les forçages climatiques spécifiques à des régions sensibles comme la Méditerranée ou l'Arctique ? Quel est le rôle des échanges entre haute et basse atmosphères et du transport à longue distance sur la composition atmosphérique ? Quel est le rôle de la dynamique de la couche limite sur les épisodes de pollution et la formation du brouillard ?

La polyvalence de la flotte actuelle permet d'aborder ces différents thèmes et de positionner la France au meilleur niveau européen et mondial dans le développement d'outils de recherches embarqués sur avions. En dix ans, SAFIRE a réalisé environ 3000 heures de vol de mesures scientifiques (50 % ATR-42, 40 % F-20, 10 % PA-23), avec la répartition suivante par type d'objectifs.

Les thématiques des campagnes scientifiques sont réparties entre environ 70 % atmosphère, 15 % surface continentale, 10 % surface océanique, 5 % divers (dont astronomie). La période 2006-2015 a vu embarquer environ 450 chercheurs ou ingénieurs dans les avions de SAFIRE. Les mesures réalisées ont été directement à l'origine d'une trentaine de thèses et de plus de 150 publications de rang A. Une étude comparative a permis d'établir que le rapport entre les coûts de fonctionnement et le nombre des publications directement générées par les campagnes de mesures est très voisin pour SAFIRE de l'opérateur anglais analogue FAAM et de la flotte océanographique française (environ 200k€ par publication directe).

Évolution et recommandations

Renouvellement de la flotte

Les deux principaux vecteurs F20 et ATR-42 arriveront en fin de vie en 2020 pour le premier et 2030 pour le second. Différents scénarios de renouvellement de la flotte ont été instruits par le comité directeur de SAFIRE avec l'appui de la communauté scientifique concernée. Le remplacement du Falcon, propriété de CNRS, par un nouveau jet en 2020 et le maintien de l'ATR,

propriété de Météo-France, jusqu'à sa fin de vie en 2030 sont ainsi des priorités urgentes pour maintenir la capacité de mesures de SAFIRE à un niveau acceptable. Cette demande a été identifiée comme une priorité des actions à mener pour faire évoluer notre flotte et bénéficier d'un large soutien de la communauté scientifique. Le remplacement du Falcon en 2020 par un nouveau jet permettra de préserver les acquis et les compétences de la communauté française (pour certaines uniques en Europe – système radar lidar par exemple), sa forte implication dans la validation des missions spatiales en disposant d'un jet d'une capacité d'emport améliorée, par exemple pour associer sur la même plateforme les instruments de mesure *in situ* des aérosols et des hydrométéores avec les instruments de télédétection ou de mesures des gaz. La polyvalence de notre flotte a aussi incité une dizaine de laboratoires du CNRS-INSU à proposer de nouveaux instruments aéroportés qui laissent présager un bon positionnement de nos équipes dans les projets de recherches internationaux du futur (études régionales du changement climatique, sécurité aérienne, gestion des aléas météorologiques et des situations de crise comme les éruptions volcaniques majeures...). Cette évolution doit aussi s'accompagner d'une meilleure visibilité pour la communauté scientifique des disponibilités effectives des avions et des alternatives possibles prenant en compte la complémentarité des plateformes (avion, ballon, drones...) et l'ouverture éventuelle vers l'Europe.

SAFIRE et flotte européenne

L'acquisition d'un nouveau jet permettra aussi à la France d'entrer dans les meilleures conditions dans le processus d'intégration européenne du fait de la faible offre européenne en matière de jets. Cette dimension européenne est en marche avec la constitution d'une AISBL EUFAR. L'ouverture européenne est vue favorablement par la communauté scientifique, mais les coûts d'accès aux avions étrangers actuellement affichés sont incompatibles avec les budgets des programmes scientifiques nationaux et le planning des autres

avions européens pouvant absorber l'activité du jet de SAFIRE (HALO ou Falcon 20 du DLR) n'est pas suffisant pour répondre à la demande des campagnes scientifiques envisagées.

Les drones

L'augmentation du socle d'utilisateurs des mesures aéroportées due à l'émergence de nouvelles thématiques (surfaces continentales notamment, au travers du partenariat en cours de mise en place avec l'ONERA) doit aussi être une question à prendre en compte même si elle concerne plutôt les avions à plus faible rayon d'action (ATR-42, drones). Concernant les drones, plusieurs projets sont déjà en cours sur les mesures environnementales les plus simples (capteurs météo classiques, turbulence, qualité de l'air, imagerie). Les conditions actuelles d'autorisation de vol pour les drones civils sont très restrictives et ne permettent pas d'envisager de remplacer les avions de recherche de SAFIRE par des drones dans un avenir prévisible. Les drones potentiellement opérés par SAFIRE auront un rayon d'action de plusieurs centaines de kilomètres et correspondent donc à des études à l'échelle régionale. Ce type de drone moyen porteur intéresse la communauté notamment pour des études à l'interface océan-atmosphère ou dans des zones sous équipées pour accueillir des avions plus gros porteurs. Il faut aussi tenir compte du besoin d'utilisation de petits drones par la communauté scientifique, notamment sur les mesures de profils verticaux (complémentarité avec les ballons captifs). Des actions de normalisation de petits capteurs à utiliser sur ces drones plus légers sont à prévoir. Plusieurs développements de petits drones existent déjà en France, et un partage d'expérience au niveau national sur la réglementation et les règles de sécurité autour de ces vecteurs est indispensable. Des initiatives de développement de drones pouvant atteindre les hautes altitudes (UT-LS) sont en cours au niveau international. Cet axe est à surveiller également, mais est plutôt à considérer au niveau de l'infrastructure ballon du CNES.

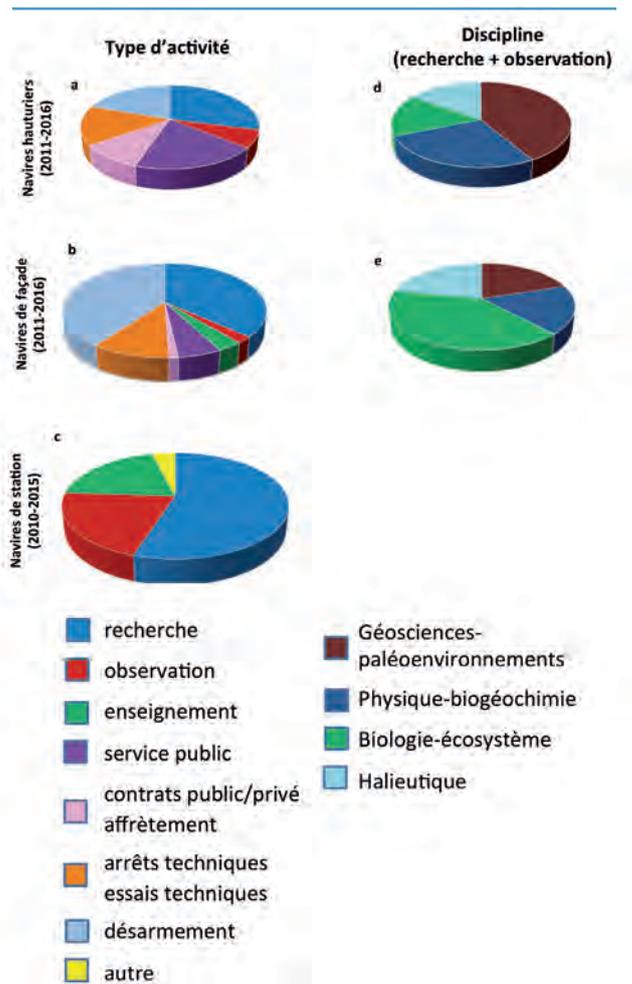
• Flotte Océanographique Française

État des lieux

La panoplie des navires hauturiers et engins sous-marins de la très grande infrastructure de recherche « Flotte Océanographique Française » (TGIR FOF) permet l'accès à tous les océans et mers ouverts du globe, hors zones polaires. Les navires côtiers et de station permettent d'assurer un continuum de moyens scientifiques entre les estuaires, les zones littorales et les zones hauturières. Les navires de la FOF sont utilisés pour des mesures et des prélèvements en mer par différentes communautés scientifiques. Pour la communauté Océan Atmosphère, les besoins concernent l'étude des processus océaniques en physique, biogéochimie et écologie, 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 et l'enseignement. En outre, l'utilisation de la FOF permet les mesures à la mer des services d'observation pour le suivi à long terme du climat et du fonctionnement des écosystèmes.

La TGIR FOF occupe une place de premier rang sur la scène internationale, en raison de la qualité des publications issues des campagnes océanographiques, du niveau de performance de ses moyens et de l'avance significative dans certains segments innovants comme les systèmes sous-marins et le carottage sédimentaire profond. En termes de nombre de navires et d'activité, elle se situe dans le trio de tête des flottes européennes avec l'Allemagne dont les moyens sont supérieurs et qui dispose de navires-brise-glace lui donnant les moyens d'accès aux zones polaires, et la France.



La gouvernance de la TGIR 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). Celle-ci doit 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.

Début 2016, le ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a chargé le PDG de l'Ifremer d'adosser la flotte à un opérateur unique, l'Ifremer. Celui-ci a choisi de s'entourer d'une équipe (dite «équipe mission FOF») pour l'assister dans cette tâche. Le calendrier est un lancement opérationnel au 1er janvier 2018, l'année 2017 servant à la mise en place. La mission FOF a remis son rapport au ministère en janvier 2017.

Les navires côtiers du CNRS-INSU étaient assujettis au ticket modérateur. Celui-ci a été supprimé depuis 2016.

Recommandations

Ce travail de prospective a été effectué par la communauté Océan du CNRS-INSU. En parallèle, une prospective FOF concernant l'ensemble des utilisateurs est en cours. Cette dernière s'appuie en partie sur la présente prospective OA.

Vers un guichet unique

Les procédures d'évaluation et de programmation des campagnes océanographiques s'appuient sur le travail des commissions nationales de la flotte hauturière et côtière (respectivement CNFH et CNFC), qui étudient avec soin la qualité scientifique des projets et l'adéquation entre ceux-ci et les moyens demandés, pour décider de la programmation (ou non) des campagnes. Si les critères de ces commissions sont souvent cohérents avec ceux demandés par les CS des programmes du CNRS-INSU, en particulier grâce à des expertises croisées, ce n'est pas le cas aujourd'hui en ce qui concerne les critères de l'ANR.

Par ailleurs, les subventions allouées au fonctionnement des navires de la flotte hauturière ne sont pas suffisantes pour assurer la maintenance et le plein emploi de la FOF pour la recherche scientifique. Par conséquent, des frais de bord peuvent être réclamés à certaines campagnes hauturières évaluées positivement par les comités *ad hoc*. Les montants de ces frais nécessitent d'être recherchés auprès de l'ANR ou de l'Europe. L'ANR ne suit pas cette demande dans la plupart

des cas, arguant que les frais de bord ne relèvent pas de sa compétence. Le fonds de soutien mis en place par l'UMS FOF en 2016 a été d'une grande aide.

Il est indispensable de simplifier et rendre plus efficaces les différentes demandes de moyens (incluant l'aide à la logistique *via* le fonds de soutien) et leurs évaluations. Une démarche concernant la flotte hauturière portée par le COSS (Conseil d'Orientation Stratégique et Scientifique de la flotte océanographique française) est en cours auprès du ministère. L'objectif est d'aboutir à un dossier unique concernant les moyens et l'évaluation de leurs demandes. L'aboutissement de cette démarche permettrait de fait plus de simplification et d'efficacité. Une telle démarche concernant la flotte côtière est également nécessaire.

Moyens d'opportunité

Les propositions de navires ou embarquements d'opportunité se font de plus en plus nombreuses (p. ex. compagnies privées, Polar Pod). Une forte recommandation est de se donner les moyens d'évaluer *a priori* ces demandes afin de bien en peser l'apport scientifique. Une suggestion en cas d'urgence serait de faire évaluer les demandes par les bureaux des CNF, selon qu'elles concernent le côtier ou le hauturier.

Qualité des services

Quelles que soient les décisions à venir concernant les armateurs et opérateurs, uniques ou non, des navires réunis au sein de la FOF, il est indispensable de maintenir, voire d'augmenter, les services associés à l'utilisation de la flotte océanographique (logistique, dossiers Zonex et ZEE, soutien en mer, etc.), services qui se dégradent depuis une dizaine d'années. La logistique scientifique des campagnes, très lourde, doit pouvoir être organisée par les opérateurs. Il est indispensable que ceux-ci proposent, directement ou indirectement, une assistance efficace et professionnelle aux laboratoires pour les expéditions, les procédures de dédouanement, etc. ainsi que pour les demandes d'autorisation de travaux. Le personnel spécifique embarqué est indispensable.

Temps navire

La communauté Océan Atmosphère rappelle que, bien qu'elle soit multifonctionnelle, la TGIR FOF est un outil tout d'abord dédié à la recherche. À ce titre, les campagnes de recherche doivent être prioritaires sur les campagnes de type service public, contrat recherche-industrie, contrat d'affrètement, etc. Il semble ainsi nécessaire qu'un cahier des charges concernant la programmation des navires existe, et qu'il précise un temps minimal de jours dédiés à la recherche.

Flotte européenne

Différentes initiatives européennes et internationales existent ou ont existé : OFEG (échange de temps navire entre pays), Eurofleet (possibilité à des pays d'accéder à des navires océanographiques d'autres pays) et ARICE (réseau européen et international pour des opérations communes utilisant des brise-glaces). Une réelle flotte européenne n'a jamais vu le jour. Eurofleet est en fin de cycle et sa reconduction peu probable. La flotte française ne possédant pas de brise-glaces de recherche, il est essentiel que l'initiative ARICE perdure, en lien avec la FOF et le CNRS-INSU.

■ Autres infrastructures et moyens nationaux du domaine OA ou dans lesquels la communauté OA est fortement impliquée

• Ballons

État des lieux

L'infrastructure Ballon du CNES permet à la communauté scientifique de sonder *in situ* l'atmosphère depuis l'interface océan-atmosphère jusqu'à la moyenne stratosphère *via* les cinq types de porteurs développés et opérés. Ils embarquent également des instruments de mesure à distance dans des configurations quasi identiques aux instruments spatiaux donnant accès de manière unique aux conditions de « *near space* » pour l'observation de la Terre, mais également pour la communauté astronomie astrophysique. Au niveau international, seules deux autres agences sont à même de mettre en œuvre ce type de porteur (NASA, JAXA).

Les activités de la communauté scientifique impliquée (dix laboratoires du CNRS-INSU OA) vis-à-vis de ces porteurs concernent : l'observation de la Terre et l'analyse de processus *via* des campagnes scientifiques coordonnées ; les développements instrumentaux novateurs et démonstrateurs d'instruments spatiaux ; la calibration et la validation de mesures spatiales. Il est à noter que les développements technologiques réalisés dans le cadre « ballon » ont créé un continuum technologique au sein du CNRS-INSU par la déclinaison et l'adaptation des concepts vers les mesures aéroportées et les mesures sol. L'optimisation des moyens de développement instrumental est un enjeu pour le futur que ce soit pour augmenter le nombre d'utilisateurs des porteurs ballon ou pour utiliser les instruments ballon sur d'autres vecteurs. L'effort de miniaturisation des instrumentations effectué par la communauté permet désormais ce transfert.

Les principales questions scientifiques auxquelles s'attache la communauté sont :

- la chimie de la stratosphère avec le suivi du contenu en ozone stratosphérique et de ses précurseurs. Les instruments mis en œuvre permettent des mesures uniques de composés bromés et chlorés qui permettent d'accéder au bilan global de ces composés et prévoir ainsi les évolutions futures de la couche d'ozone. Cette activité s'appuie principalement sur les ballons stratosphériques ouverts (BSO) ;
- la dynamique de l'atmosphère avec en particulier la caractérisation des échanges à l'interface haute troposphère / basse stratosphère, inhérents à l'impact de la convection en région intertropicale et à l'activité ondulatoire, et l'évolution de la circulation à grande échelle de Brewer Dobson et l'évolution de la dynamique du vortex polaire dans le contexte du changement climatique. L'utilisation des ballons pressurisés stratosphériques a permis des avancées notables sur cette thématique ;
- Les mécanismes d'import-export d'aérosols et de composés chimiques et la compréhension du vieillissement des masses d'air au-dessus des zones océaniques dans le cadre des chantiers du CNRS-INSU. Ceci s'appuie sur de nouveaux capteurs embarqués sur des ballons pressurisés couche limite (BPCL) ;
- l'étude des cyclones *via* les mesures à l'interface océan-atmosphère avec les aéroclippers ;
- la calibration/validation des mesures des instruments spatiaux GOMOS, MIPAS à bord de la plateforme ENVISAT et plus récemment IASI.

Évolution et recommandations

Évolution structurelle

L'infrastructure a vu de nombreuses évolutions au niveau de la gestion du pilotage des priorités scientifiques et de l'offre. Depuis 2016, les priorités scientifiques sont établies conjointement par le comité TOSCA du CNES et le programme LEFE du CNRS-INSU, puis déclinées *via* le Comité Technique Ballon (CNES-CNRS-INSU) dont les missions sont équivalentes à celle du Comité Scientifique et Technique Avion. Suite au séminaire de prospective du CNES de La Rochelle en 2014 et au séminaire Ballon (CNES-CNRS-INSU) en 2015, le projet STRATEOLE Phase 2 pour l'étude de l'activité ondulatoire en région intertropicale a été jugé prioritaire. Les nouvelles instrumentations développées et en cours de développement (l'effort est à poursuivre) devraient permettre le montage de projets scientifiques robustes associés aux campagnes BSO. En termes d'offres ballon, les conclusions du séminaire réitèrent le besoin de mise en œuvre d'une base de lancement BSO en région intertropicale en complément d'un site de moyennes latitudes maintenant ouvert à Timmins (Canada). La pertinence

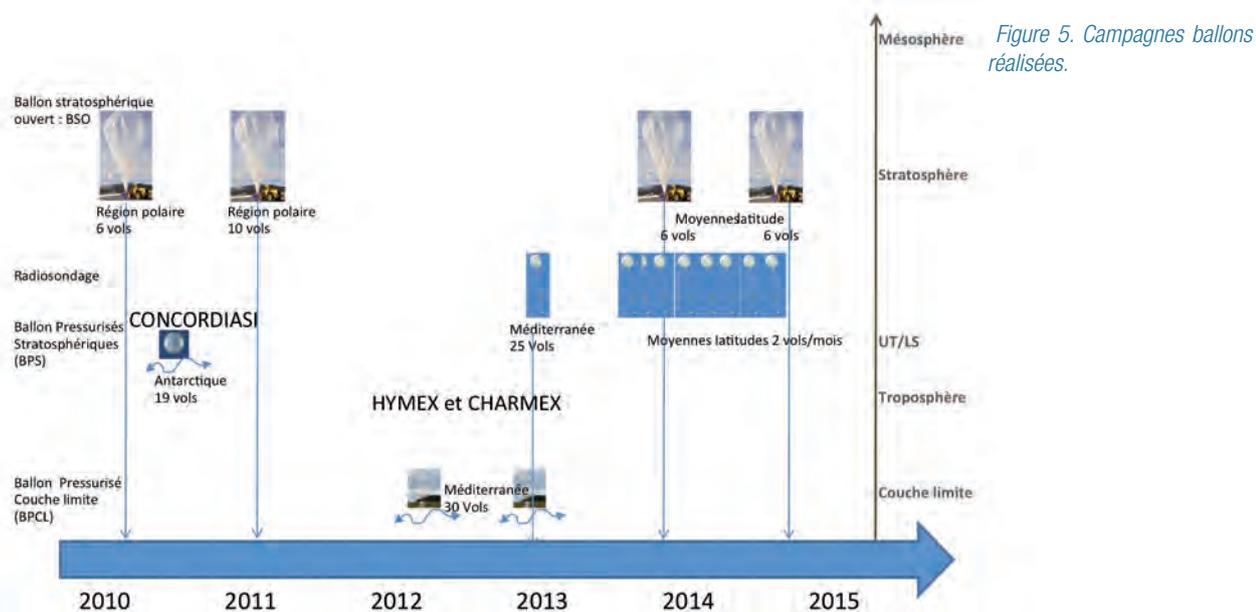


Figure 5. Campagnes ballons réalisées.

de l'utilisation des aéroclippers pour l'étude de cyclones est en voie de maturation. Ces recommandations sont toujours d'actualité.

En 2016, le projet d'infrastructure européenne HEMERA piloté par le CNES a vu le jour, en réponse l'Appel d'offres INFRAIA du H2020. La mobilisation de l'ensemble des scientifiques français et du pôle AERIS permet au CNRS de piloter deux groupes de travail pour le développement de capteurs innovants et d'algorithmes d'inversion, et la base de données scientifiques associée. La lettre d'intention a été présélectionnée par l'Europe et le dossier final est en cours de rédaction. Une synergie scientifique européenne autour de ce porteur est un enjeu majeur pour le futur.

Évolution des instrumentations

La synergie instrumentation ballon-avion est possible technologiquement avec plusieurs exemples réussis de transfert d'expertise de la communauté ballon vers de l'instrumentation aéroportée. L'ensemble des initiatives est à encourager. Les instrumentations permettant de mesurer *in situ* et à distance les caractéristiques des nuages existent sur le porteur avion et mériteraient d'être disponibles sous ballon. Pour les mesures *in situ*, un vecteur dont la trajectoire peut être contrôlée précisément (ballon captif ou avion) paraît plus adapté; par contre le ballon offre pour les mesures à distance une géométrie identique aux satellites avec l'assurance d'être au-dessus des nuages en région tropicale. Grâce aux efforts de miniaturisation des instruments, des mesures de gaz à effet de serre et d'aérosols sous ballon météorologique sont désormais effectuées régulièrement sur la base de lancement du CNES d'Aire sur Adour. Ceci permet d'exploiter de longues séries

de données et d'étudier les processus clés qui affectent la variabilité de ces observables. Il est nécessaire de positionner au mieux ces mesures vis-à-vis des mesures acquises par les réseaux sol (ICOS, NDACC, AERONET de ACTRIS France) avec potentiellement l'implantation d'instrumentation sol sur ce site. Concernant la validation des missions satellite, un plan d'utilisation des ballons et des avions dans les exercices de calibration-validation est à mettre en place de manière ouverte et concertée au sein du CNRS-INSU en sollicitant l'ensemble des scientifiques. Enfin, en miroir d'EU-FAR, les efforts de structuration européenne des activités ballon engagées *via* le projet HEMERA sont bénéfiques pour conforter le savoir-faire des équipes françaises et les faire perdurer, les ballons apparaissant comme une niche scientifique à plus-value forte.

• Gliders

État des lieux

En 2008, le CNRS-INSU a créé en partenariat avec le CETSM/Ifremer et le concours de la DGA, de l'IRD et de l'UPMC une cellule nationale glider intégrée à la DT du CNRS-INSU et localisée à La Seyne-sur-Mer. Depuis 2008, 15 gliders ont rejoint le parc à La Seyne. Actuellement (année 2016), 4 gliders ont été perdus en mer, 5 sont hors d'usage, 6 sont opérationnels (3 gliders 1000 m et 3 gliders 200 m) et un autre doit être remis en service (Seaglider). Par ailleurs le parc espère remettre en service le Spray de l'IRD et un Slocum d'Ifremer qui ont rejoint le parc à l'automne 2016. Ces planeurs sous-marins de petite taille (2 m, 50 kg) et d'une autonomie de 2 à 4 mois sont déployés et récupérés à partir de petites embarcations. Pilotés depuis la terre, ils permettent de réaliser la collecte de données physiques (température, salinité, courants) et biogéochimiques

(oxygène, fluorescence, rétrodiffusion optique, nitrates, PAR...) ou encore acoustiques (vent, pluie, mammifères...) à haute résolution et le long de trajectoires en dents de scie entre deux profondeurs déterminées, généralement entre la surface et 1 000 m ou le fond.

Compte tenu de l'augmentation de la charge de travail due au suivi opérationnel des gliders et de la perte de compétence due aux départs importants de personnels de l'équipe, la CSOA a commandé un audit sur le fonctionnement de cette cellule en 2014. Il a permis de rétablir la cellule glider à un niveau opérationnel en consolidant l'équipe (1 IE CNRS responsable de service, 1 IE CNRS électronicien, 1 TCN CNRS, 0.5 T Ifremer plus un poste IE instrumentaliste en CDD voué à être pérennisé), de renforcer le rôle opérationnel du Comité National de Pilotage des Gliders (CNPG) qui assume l'évaluation et la procédure d'attribution des campagnes ainsi que son pilotage scientifique, de mettre en place un suivi systématique des capteurs de température et de conductivité qui permet d'évaluer les éventuelles dérives entre deux missions consécutives. Par ailleurs, des relations étroites et régulières sont entretenues entre Coriolis et la cellule glider, notamment pour échanger sur les formats et les résultats des contrôles qualité menés par Coriolis.

D'après le site <http://www.ego-network.org>, depuis l'achat du premier Glider en 2008, 131 déploiements ont été effectués pour un total de 4314 jours de mer, soit une moyenne de 500 jours annuels.

En 2015, 13 missions ont été effectuées. Elles correspondent à 18 mois de mer (soit aussi bien qu'en 2011 avec des engins récents) au profit du SNO/SOERE MOOSE (radiales d'observation récurrentes; ~70 % du volume total annuel), du CNES (radiales altimétriques au large de Toulon), du CEFREM (étude de la turbidité au large du Rhône) et de l'IRD au Pérou (échantillonnage du phénomène climatique El Niño), avec des périodes de pilotage de 4 planeurs en simultané. Par ailleurs, le parc gliders a été ou est impliqué à divers titres dans 5 projets européens (INCOMMET, COST, JERICO/JERICO-NEXT, PERSEUS, GROOM). Ces missions ont pu être effectuées malgré de nombreuses difficultés opérationnelles nécessitant notamment le prélèvement de composants ou de pièces sur un planeur pour les installer sur un autre.

Recommandation

Malgré le rétablissement récent de la cellule glider à un niveau opérationnel, l'équilibre, en particulier financier, reste précaire avec notamment une flotte vieillissante. Il sera nécessaire de mettre en place rapidement, avec l'ensemble des partenaires impliqués et des principaux utilisateurs, un plan de maintien

en condition d'une partie de la flotte et un plan de jouvence (le coût d'un glider neuf est de 150 k€), sans lesquels le parc pourra difficilement perdurer.

• Centre de Carottage et de Forage National (C2FN)

États des lieux

Dans le cadre des réorganisations des différentes structures et commissions du CNRS-INSU, la direction scientifique du CNRS a décidé de mutualiser toutes les plateformes de carottages au sein d'une entité nationale, le C2FN (<http://c2fn.dt.insu.cnrs.fr>). Le C2FN a ainsi vu le jour en 2009. Cette plateforme se compose d'une branche Glaciologie, d'une branche Continent et d'une branche Océanographie. Le C2FN est ainsi l'outil par lequel le CNRS organise l'accès aux moyens de forage pour l'ensemble de la communauté nationale. À travers un financement EquipEx (projet CLIMCOR) et l'établissement de l'outil national, le C2FN a vu ses moyens considérablement augmenter, permettant ainsi à la communauté française le développement de ce savoir-faire comme une action prioritaire de la stratégie nationale de recherche. Le C2FN est organisé en quatre cellules :

Les activités de forage et de carottage glaciaire ont été initiées il y a une trentaine d'années au LGGE, mais concernent désormais d'autres laboratoires (LSCE, CEREGE, IPG...). Les priorités de développement et de mission sont gérées par le groupe scientifique Carotte de Glace France qui se réunit au moins une fois par an. Le C2FN Glace est aujourd'hui constitué de 7 agents qui gèrent et maintiennent un parc de plus de 7 ensembles de carottages, dimensionnés pour réaliser des prélèvements allant de quelques mètres (configuration transportable par hélicoptère en haute altitude) aux carottages profonds de plusieurs kilomètres sur le plateau Antarctique. Le C2FN Glace gère également un système de forage rapide à eau chaude et des sondes de mesures géophysiques déployées dans les trous de forages. Les zones d'intervention vont de l'Antarctique au Groenland, en passant par les glaciers tempérés dans les Alpes ou dans les Andes. Au total, plus de 5 000 mètres de carottes ont été extraits.

Le carottage continental regroupe 4 domaines pour lesquels des moyens de sondage fondamentalement différents sont mis en œuvre : terrestre, lacustre, côtier et littoral. La partie Continent s'appuie sur plusieurs laboratoires (EDYTEM, EPOC, M2C, Geosystèmes...) et la DT du CNRS-INSU. Les priorités de développement et de mission sont gérées par le groupe scientifique « carottage continental ». Le C2FN Continent est composé de 2 personnels de la DT du CNRS-INSU et de 3 personnels d'EDYTEM. Le matériel disponible permet de

prélever : 1) des carottes en environnement terrestre grâce à une sondeuse autotractée SEDIDRILL, les carottiers disponibles permettant d'obtenir un taux de récupération proche de 100 % dans les couches supérieures non consolidées (0 à 20m) et d'atteindre jusqu'à la profondeur d'une centaine de mètres ; 2) des carottes en environnement lacustre grâce à une barge associée à un carottier à piston permettant de prélever une séquence de sédiments variant de 25 à 50 mètres pour des profondeurs pouvant atteindre jusqu'à 300m.

Le carottage océanique est piloté par les communautés IMAGES (*International Marine Past Global Changes Study*) et IODP (*International Ocean Discovery Program*). L'IPEV et la DT du CNRS-INSU gèrent les moyens et personnels techniques pour les développements et mises en œuvre du carottier géant Calypso sur le Marion Dufresne ainsi que pour d'autres types de carottiers océaniques. Le C2FN Océanique est actuellement composé de 4 agents IPEV et d'un agent de la DT du CNRS-INSU. Le matériel est composé principalement d'un parc de divers carottiers, dont le carottier géant Calypso, ainsi que d'un treuil, d'un câble et d'appareils de manutention dédiés, entièrement rénovés. Les moyens d'analyse (capteurs, banc MST) et de conditionnement (banc de découpe) sont également fournis. Depuis 1995 (date du lancement du Marion Dufresne 2), 1 500 carottes océaniques de 45 mètres de moyenne ont été extraites, dont une majorité par Calypso, et ce, dans toutes les mers du globe. Tout dernièrement, la plus grande carotte au monde, 60 mètres de colonne sédimentaire sans aucune perturbation, a été faite par le C2FN Océan.

La cellule de coordination assure le lien entre les pôles scientifiques et techniques. Elle est composée de 2 agents.

Recommandation

Actuellement, l'archivage physique et numérique des carottes est placé sous la responsabilité des laboratoires chargés des campagnes de prélèvement, sans réelle coordination nationale, et sans toujours avoir les moyens (espace, personnel) suffisants. Une structuration nationale permettant d'assurer et pérenniser la conservation des échantillons dans les laboratoires ou dans un lieu commun, ainsi que d'optimiser l'accessibilité des échantillons et des données et métadonnées est nécessaire. Cette structuration pourrait notamment s'appuyer sur la base de données développée dans le cadre de l'EquipEx CLIMCOR qu'il conviendrait de finaliser *via* le C2FN et de pérenniser *via* un pôle de données.

■ Autres points de prospective

Modèles économiques

Parmi les parcs instrumentaux, Instruments Nationaux et Services Nationaux d'Analyse, certains éprouvent de réelles difficultés dans leur fonctionnement financier (voir l'exemple des gliders ci-dessus). Les besoins financiers concernent l'acquisition et la jouvence des appareils, leur entretien et la formation des personnels sur les nouveaux appareils. Le coût demandé aux utilisateurs et les dotations récurrentes ne permettent pas toujours de couvrir l'ensemble de ces frais. Ainsi, les modèles économiques ne sont pas toujours en adéquation avec les besoins. Il s'avère nécessaire de redéfinir le périmètre des parcs, instruments et services ainsi que leurs modèles économiques.



Interactions recherche - société et formation

Les sciences portées par la communauté Océan Atmosphère sont au cœur de la société, qu'il s'agisse du réchauffement climatique et du triptyque compréhension/impacts/adaptation et mitigation, des services écosystémiques ou des autres domaines pour lesquels nos sciences sont utiles à la société. Ce lien s'est d'abord fait par des rapports d'expertise, comme ceux du GIEC ; puis, plus proche des citoyens, par le biais des médias, des politiques et maintenant des entreprises, collectivités locales et autres acteurs de la société civile. Cette « sortie des labos », si elle ne fait plus débat parmi les scientifiques, désormais conscients de leur rôle social et de l'urgence de l'action climatique et environnementale, ne va pas de soi. Elle demande par exemple de maîtriser des codes qui échappent à la communauté scientifique, elle prend du temps et s'ajoute à des activités de recherche par ailleurs prenantes. De plus, cet investissement est souvent le fait d'une initiative individuelle et, en tout cas en comparaison à d'autres domaines scientifiques, elle est peu organisée et peu soutenue au niveau collectif, même si de nombreuses initiatives locales existent. Ce sont souvent les mêmes chercheurs qui sont sollicités, les mettant sous une pression importante et limitant la nécessaire diversité de l'expertise.

■ Contexte et enjeux

Le rôle social des scientifiques est multiple. Il s'agit bien sûr en premier lieu de générer de la connaissance sur le monde qui nous entoure, puis de la partager. Ce partage se fait d'abord vers les autres scientifiques, ensuite vers la société. Cette seconde étape du partage demande un travail de « décodage » qui prend des formes diverses et qui n'est pas du seul fait des scientifiques. Le principal atout de notre communauté est sa maîtrise des sujets, son esprit critique éclairé et reconnu qui lui confère une caution intellectuelle dans les débats de société. Les citoyens accordent en effet, à une très large majorité, leur confiance aux scientifiques. Ce lien fort est vécu par tous ceux qui ont un échange direct avec le grand public.

Il est ici utile de distinguer d'emblée trois types d'action vers la société : la médiation scientifique, la communication scientifique et la communication institutionnelle. La médiation scientifique implique un échange direct entre chercheurs et citoyens et demande pédagogie et qualité relationnelle. Elle est aussi une action qui s'inscrit dans le moyen terme. C'est celle qui est la plus gratifiante pour les chercheurs et celle pour

laquelle ils sont prêts à passer du temps. La communication scientifique a pour objectif de rendre compte d'avancées scientifiques et se traduit par exemple par des communiqués de presse – la relation est donc plus distante et dans un seul sens. La communication institutionnelle a pour but de valoriser l'institut de recherche qui la pratique avec pour objectif une reconnaissance par le public ou les financeurs. Elle n'est pas à l'initiative des chercheurs. Une réflexion est aujourd'hui nécessaire pour mieux organiser la complémentarité de chacune de ces trois activités.

Les choix de société à faire pour limiter notre empreinte environnementale (réchauffement climatique, pollutions diverses...) et nous adapter s'appuient sur une expertise qui va au-delà des sciences OA. Le « retour » des citoyens vers les scientifiques demande donc d'organiser un pont interdisciplinaire, en particulier avec les sciences sociales. Le périmètre des interactions recherche-société des labos OA rattachés au CNRS-INSU est large et il faut sans doute se concentrer sur la vraie valeur ajoutée de nos sciences. D'un autre côté, la parole publique est très souvent donnée aux acteurs de l'écologie environnementale et à l'ingénierie des solutions, au détriment de la compréhension des mécanismes qui régissent son fonctionnement, au cœur de notre expertise. Cette réflexion rejoint celle des services climatiques qui devraient idéalement organiser le juste équilibre entre ces différentes communautés.

Autre particularité de la communauté OA, la multitude des instituts qui font de la recherche sur le climat complique singulièrement toute démarche commune. Par exemple, les instituts du CNRS (et de façon plus large les organismes liés à AllEnvi) ont des stratégies de communication scientifique et institutionnelle propres, ce qui entraîne parfois un casse-tête contreproductif. Des actions communes sont pourtant à encourager car fortement visibles (COP21, Train du climat...) et détachées de l'aspect « institutionnel » pas toujours adapté au grand public.

■ État des lieux sur la formation en OA

La formation supérieure initiale sur les questions OA débute le plus souvent par des unités d'enseignement de découverte en licence (physique, chimie, SVT) ou en écoles d'ingénieurs, et prend toute sa dimension dans une vingtaine de masters

dédiés, déclinée en une quarantaine de parcours ou spécialités (voir tableau de synthèse sur le site du CNRS-INSU). Ces masters sont répartis en France sur l'ensemble du territoire, à travers une douzaine de pôles universitaires : Île-de-France, Sud-Est (Nice, Aix-Marseille, Toulon), Auvergne-Rhône-Alpes (Grenoble, Lyon, Clermont-Ferrand), Centre (Orléans), Nord (Lille), Nord-Ouest (Brest), Sud-Ouest (Toulouse, Bordeaux, Perpignan). L'offre de formation en master (avec des parcours plus orientés recherche dont le débouché naturel reste la thèse, et des parcours plus professionnalisants dont le débouché principal est le métier d'ingénieur/chargé d'études dans une entreprise privée dans les domaines air ou eau) s'est beaucoup développée au moment de la réforme LMD, il y a 10 ans. Elle est aujourd'hui importante au niveau national mais parfois confuse (p. ex en Île-de-France). En particulier, les spécificités thématiques propres à un parcours OA ne ressortent pas toujours clairement malgré un souci d'affichage *via* des sites internet dédiés.

Les effectifs sont variables et s'établissent généralement autour de 10-20 étudiants en M1 et autour de 5-10 étudiants par parcours de M2. Il est à noter qu'au cours de cette dernière décennie, les parcours de master reposant sur la physique ont subi une érosion notable, due en grande partie à la baisse des effectifs en licence de physique et au renforcement des promotions dans les écoles d'ingénieurs. Cela n'est pas (ou moins) le cas des parcours reposant sur la chimie ou les sciences de la vie. L'accueil d'étudiants étrangers se pratique dans les masters OA dans le cadre ou non de partenariats internationaux plus formalisés. Environ 20 % des parcours OA s'appuient sur des collaborations internationales, parfois avec une labélisation Erasmus Mundus.

La plupart des masters proposent un ou des stages de terrain, de quelques jours à une semaine. Généralement très appréciés des étudiants, ces stages permettent de mettre en pratique les connaissances acquises, ou représentent une autre façon d'aborder les connaissances (pédagogie active), tout en soudant les promotions. Ces stages s'appuient souvent sur des moyens du CNRS-INSU (sites d'observation ou instrumentés, flottes, etc.). Des stages en modélisation apparaissent également (stage en modélisation du climat, etc.). Le financement et la pérennité de ces stages de courte durée sont malheureusement régulièrement remis en question, dans un contexte de difficultés budgétaires, alors qu'ils devraient être (encore plus) au cœur des enseignements de nos disciplines.

■ Recommandations

Médiation scientifique : nous recommandons d'encourager et de développer la culture de la médiation scientifique dans la communauté (en particulier avec l'appui de nos sociétés savantes comme Météo et Climat), de former les chercheurs (dès la thèse) et de faire appel à des professionnels de la médiation. À ce titre, les sciences participatives peuvent aider à créer un lien durable entre recherche et citoyens acteurs. Cet encouragement passe par une meilleure reconnaissance de ces activités dans l'évaluation des personnels (médiation, liens avec médias, expertise). Institutionnellement, il est souhaitable que cet effort s'appuie sur un rapprochement entre le CNRS-INSU, le CNRS-INEE et le CNRS-INSHS sur les questions environnementales et climatiques. Un certain nombre de suggestions sur la communication sont à la disposition du CNRS-INSU.

L'enseignement au lycée : la transmission des savoirs vers les programmes scolaires est difficile. La formation sur les questions OA au lycée, essentiellement effectuée en SVT aujourd'hui, ne donne pas aux élèves l'image que les océans et l'atmosphère ont aussi des dimensions physiques qu'il conviendrait d'étudier en physique-chimie. Il serait possible, sans révolutionner les programmes scolaires, d'inclure des notions sur le système climatique incluant un volet observation et modélisation en classe de physique-chimie au lycée. Le développement d'activités interdisciplinaires au collège et au lycée en lien avec OA, *via* une participation active et coordonnée de laboratoires et de chercheurs, est à encourager et à accompagner, en concertation avec les inspecteurs d'académie. D'autres formes d'éducation (Glace et ciel, association Wild-Touch, LAMAP, Guideez...) ont montré leur potentiel et sont à encourager. Des initiatives locales permettent de former des enseignants, relais efficaces vers les jeunes.

L'enseignement supérieur : Au regard des enjeux sociétaux majeurs pour les décennies à venir concernant le changement climatique dans toutes ses dimensions (science, atténuation, adaptation, impacts...), l'attractivité des filières OA paraît très insuffisante aujourd'hui. Ceci est en partie imputable au fait que les débouchés des masters et des thèses ne sont pas toujours très clairs en dehors du monde académique, alors que les étudiants acquièrent des compétences valorisables aussi dans le secteur privé (compétences techniques sur des méthodes

de mesure et d'analyse, ou des codes numériques, conduite de projet, travail en équipe, traitement de problèmes complexes, travail dans un monde globalisé...). Cette situation rétroagit en amont sur l'orientation des étudiants vers les filières OA. Afin d'améliorer la visibilité des formations par et pour la recherche en OA, et de mieux accompagner les activités de formation, il est recommandé :

- de mettre en place, sur le site du CNRS-INSU, une page internet dédiée aux questions de formation recensant : les filières OA, les formations terrain proposées, les débouchés (métiers intra ou extra académiques) ;
- de renforcer la formation pratique (observations et modélisation) en master en s'appuyant sur les moyens expérimentaux, analytiques et de modélisation des laboratoires et des infrastructures du CNRS-INSU, *via* (i) la création ou la pérennisation de financements dédiés (accès aux SO/SI, heures de vol, frais de mission des étudiants, etc.) ; (ii) la création d'un catalogue national des formations de terrain en OA permettant de les promouvoir et d'offrir la possibilité d'accueillir plus d'étudiants ;
- de définir des mécanismes de financement des stages supérieurs à deux mois des étudiants de master, en fin d'IUT ou en dernière année d'école d'ingénieur, par exemple par la mise en place d'un budget dédié.

Liens avec les médias : les initiatives visant à favoriser les relations directes entre les journalistes et les scientifiques sont à encourager (p. ex. visites de journalistes dans les laboratoires, contribution au cursus des écoles de journalisme, formation à la médiation (et média training) pour les chercheurs, journées de réflexion commune...).

Liens avec le monde de l'entreprise : il est difficile d'établir des liens avec les entreprises (formation, expertise), et les actions sont pour l'instant menées au cas par cas, sans cadre méthodologique ou déontologique. Une recommandation faite est qu'il pourrait être dans les attributions de la future CSOA de réfléchir à un cadre déontologique plus précis (il pourrait peut-être s'appuyer sur des éléments de la charte nationale de déontologie de la recherche). Le CNRS-INSU a un rôle majeur à jouer (formation, innovation et valorisation, p. ex. services climatiques) et il y a plusieurs pistes à explorer.

En conclusion, la CSOA recommande que les pratiques de la recherche de la communauté OA soient en adéquation avec les objectifs qu'elle affiche vis-à-vis de la société. Une mutualisation accrue permettra de mieux gérer une demande sociétale parfois forte et de trouver le nécessaire équilibre entre recherche appliquée (thèmes sociétaux « utiles ») et recherche fondamentale (« de l'utilité de l'inutile »).



Ressources humaines

■ Analyse des ressources humaines

Note de lecture :

Les figures portent la même numérotation que dans le précédent rapport de prospective. Les figures supplémentaires sont numérotées en A, B, etc.

Exceptée l'analyse sur les effectifs globaux, le périmètre de l'étude est limité aux unités du CNRS-INSU/OA à l'exclusion des UMS et UPS du CNRS-INSU, même si elles apportent un soutien conséquent à la discipline. Ces unités qui, pour l'essentiel, sont rattachées aux OSU du CNRS-INSU, concernent un périmètre beaucoup plus large que celui du domaine OA et mériteraient d'être analysées au niveau qui convient. Par ailleurs, un encart sur la DT du CNRS-INSU incluant ses effectifs se trouve page 89 du présent document.

Le terme IT est utilisé indifféremment pour les personnels CNRS ou ceux des autres organismes y compris les universités.

Concernant les CDD, la base de données a été construite auprès des directeurs d'unité principalement. Il s'avère que les données récoltées sont parfois incomplètes, parcellaires ou erronées, il faut donc considérer les chiffres et analyses sur les CDD uniquement comme des tendances du fait des nombreuses erreurs et probablement omissions dans la base de données. Les données ainsi récoltées constituent donc des estimations basses. Notamment, pour deux unités, les données transmises étaient inexploitable (BAP des CDD IT et domaines d'activité des CDD chercheurs non renseignés). On peut noter que la qualité du suivi des informations sur les agents CDD dans les unités du CNRS-INSU/OA n'a pas progressé depuis la précédente prospective, les choses s'étant même complexifiées du fait de nouvelles sources de financement potentiel pour ces CDD, notamment celles issues du PIA (EquipEx, LabEx et IdEx). Les outils disponibles ne permettent que difficilement d'assurer le suivi et la pérennisation des informations en multi-tutelles au sein des UMR. Au total, les unités du domaine OA ont déclaré 1339 CDD de plus de 3 mois sur la période allant de 2011 à 2016. Certaines unités ont détaillé, comme demandé, tous les contrats sur cette période, d'autres n'ont indiqué que les contrats en cours. Pour les contrats en cours en juin 2016, le nombre total de CDD est de 348 avec 161 IT et 187 chercheurs (à comparer à 138 IT et 196 chercheurs lors de la précédente prospective).

Au total, les CDD représentent 19,9 % des IT et 17,7 % des chercheurs avec un pourcentage global de 18,5 % de l'ensemble des agents. Il est notable que ces agents CDD

passent souvent sur plusieurs contrats et sur plusieurs fonctions, y compris de CDD IR à CDD chercheur. Certains agents se retrouvent aussi sur différentes unités.

● Effectifs globaux (personnels permanents)

L'analyse globale porte sur les unités du CNRS-INSU/OA + CEREGE (SIC), GEOAZUR (TS) et LPC2E (AA). Ces trois unités sont prises en compte, car elles ont une population importante de personnels soit rattachés à la section 19, soit travaillant sur des thématiques de cette section.

Comparé au précédent rapport, le MIO (Institut Méditerranéen d'Océanographie) est une nouvelle unité qui a regroupé notamment les unités du CNRS-INSU/OA : LMGEM (Laboratoire de Microbiologie, Géochimie et Ecologie Marines), LOPB (Laboratoire d'Océanographie Physique et Biogéochimie) et LSEET (Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre). Le LOPS (Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale) a essentiellement regroupé le LPO (Laboratoire de Physique des Océans) et le LOS (Laboratoire d'Océanographie Spatiale, unité Ifremer).

Les unités du CNRS-INSU/OA comprennent 885 Ch et EC et 649 IT permanents tous employeurs confondus. En incluant CEREGE, GEOAZUR et LPC2E, on arrive à 1061 Ch et EC et 765 IT permanents (Figure 1). Sur les 39 CNAP de la Figure

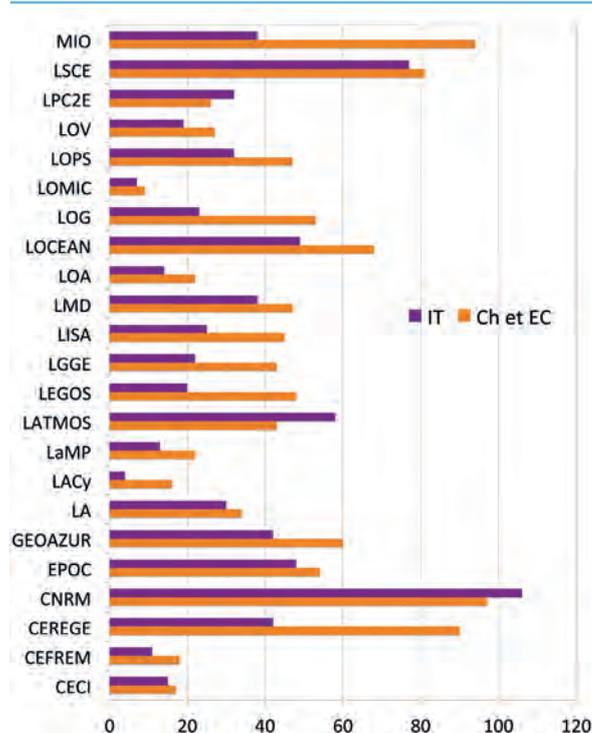


Figure 1a. Répartition des personnels permanents (1061 Ch-EC et 765 IT) dans les unités du CNRS-INSU/OA + CEREGE, GEOAZUR et LPC2E suivant leur catégorie et rapport IT/(Ch+EC).

1b, 8 sont du corps des astronomes dont 1 au LATMOS et les autres à GEOAZUR et au LPC2E.

En comparaison avec le précédent exercice de prospective, la population de Ch et EC semble avoir augmenté, 885 contre 803 travaillant dans les unités du CNRS-INSU/OA. Par contre, la population d'IT est restée stable avec 649 IT contre 648 lors de la précédente prospective. Si l'on considère que le périmètre de l'étude actuelle est un peu supérieur du fait du changement de certaines unités, cela semble indiquer une érosion du potentiel IT du domaine OA.

Les deux unités ayant le plus fort rapport IT/Ch sont celles travaillant en lien avec le spatial (LPC2E et LATMOS). En dehors de ces unités, seul le CNRM, en raison de son fort taux d'IT Météo-France, a un rapport au-dessus de 1.

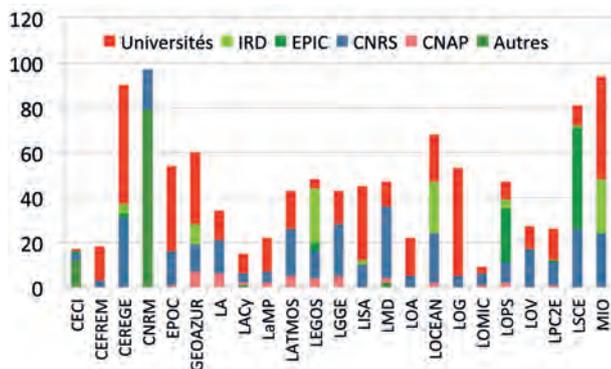


Figure 1b. Répartition des personnels permanents Ch et EC dans les unités du CNRS-INSU/OA + CEREGE, GEOAZUR et LPC2E suivant leur appartenance.

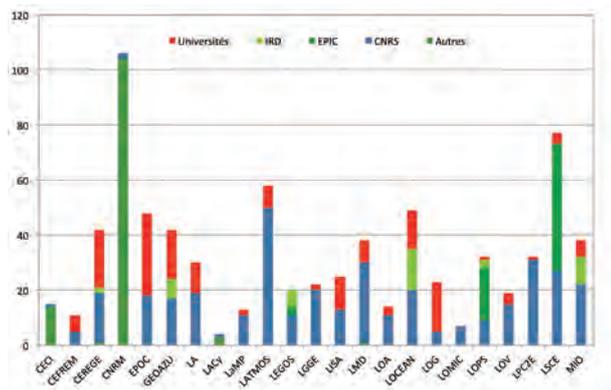


Figure 1c. Répartition des personnels permanents IT dans les unités du CNRS-INSU/OA + CEREGE, GEOAZUR et LPC2E suivant leur appartenance.

Répartition par appartenance

Pour les personnels permanents dans les unités du CNRS-INSU/OA, les personnels CNRS représentent 37 % de l'effectif, les principaux organismes partenaires sont les universités (32 %), Météo-France (12 %), l'IRD (7 %), le CEA (6 %), l'Ifremer (3 %), le Cerfacs (2 %) et le CNES (1 %).

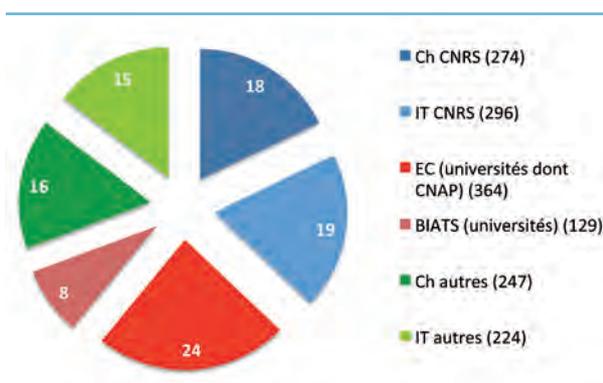


Figure 2a. Répartition en pourcentage par appartenance (CNRS, universités et autres organismes) des personnels permanents des unités du CNRS-INSU/OA. Le terme université englobe les personnels rémunérés par les universités, le MENESR et le CNAP.

En comparaison avec la précédente prospective, l'évolution la plus frappante est la différence de répartition parmi les IT : le nombre d'IT est stable, la contribution des organismes autres est similaire à la précédente prospective, mais la contribution du CNRS diminue, passant de 317 à 296, alors que celle des universités augmente, passant de 106 à 129.

Organismes	Chercheurs		IT	
	nombre	%	nombre	%
Météo France	82	33,2	108	48
CEA	45	18,2	46	20,5
CNES	5	2	3	1,3
Ifremer	24	9,7	19	8,4
IRD	78	31,6	34	15,2
CERFACS	11	4,5	14	6,2
Autres	2	0,8	1	0,4
Total	247	100	225	100

Tableau 1. Répartition des personnels permanents des organismes autres que le CNRS et les universités, affectés dans les unités du CNRS-INSU/OA.

Pour les chercheurs, les personnels permanents hors CNRS et universités représentent environ 28 % des effectifs des unités du CNRS-INSU/OA. Pour les IT, ils représentent 34,5 %. Le Tableau 1 montre en comparaison avec la précédente prospective que l'IRD a pris un poids plus important passant de 91 personnels à 112, augmentation concentrée sur les Ch. Les personnels IRD se répartissent principalement entre le LEGOS, le LOCEAN et le MIO. On remarque aussi une augmentation significative des personnels Ifremer qui sont passés de 21 à 43 avec une augmentation plus importante sur les Ch. Cette augmentation s'explique par la création du LOPS qui a intégré le LOS, unité purement Ifremer. Pour le CEA, la contribution est similaire mais la répartition a changé : le nombre de Ch est passé de 51 à 45 alors que le nombre d'IT est passé de 39 à 46. L'évolution est inverse pour Météo-France : la contribution a un peu diminué passant de 195 à 190 avec un nombre de Ch qui a augmenté, passant de 75 à 82, mais un nombre d'IT qui a diminué, passant de 120 à 108.

Répartition par région

La majorité des personnels permanents sont en Île-de-France qui compte trois sur six des unités dépassant 100 permanents. Les autres grosses unités sont le MIO en PACA, le CNRM en Occitanie et EPOC en Nouvelle-Aquitaine. Le poids important de l'Occitanie est lié à la présence de trois unités OA : le CNRM, le LA et le LEGOS. 38 % des Ch et EC et 32 % des IT sont en Île de France, 22 % et 26 % respectivement en Occitanie. 47 % des IT CNRS sont en Île-de-France ce qui est en baisse par rapport à la précédente prospective (51 %).

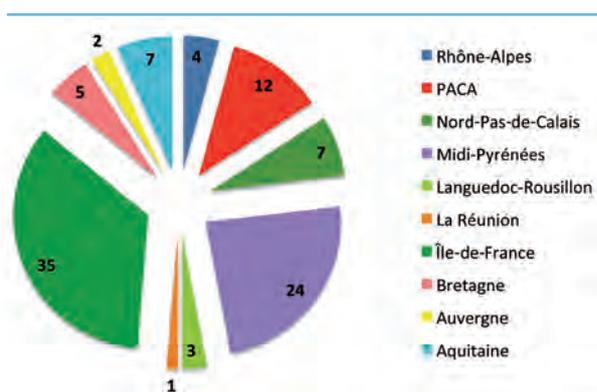


Figure 2b. Répartition en pourcentage des personnels permanents des unités du CNRS-INSU/OA par région.

Répartition par tranche d'âge

Pour les Ch et EC, contrairement à ce qui avait été observé lors de la précédente prospective, on assiste à un net recul des deux premières tranches d'âge que ce soit sur les Ch CNRS ou les EC. Pour le CNRS, le recul de l'âge de recrutement des chargés de recherche peut expliquer en partie cet effet (32 ans

pour les CR2 et 37 ans pour les CR1 selon le dernier rapport de conjoncture de la section 19), mais aussi par la baisse du nombre de postes au concours CR (11 en 2006 contre 5 en 2016). On observe par ailleurs une population homogène sur les tranches d'âge intermédiaires entre 35 et 54 ans et une population relativement importante indiquant un vieillissement sur les deux dernières tranches d'âge si l'on compare à la précédente prospective (22 % des Ch-EC ont 55 ans ou plus).

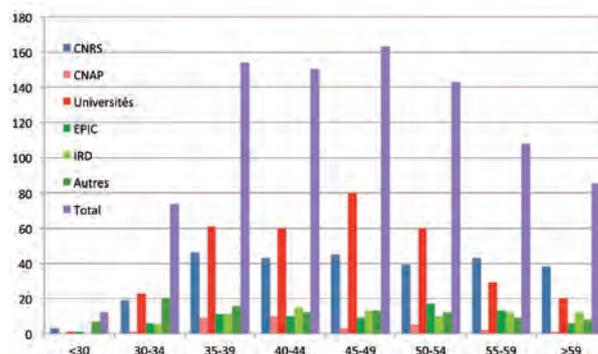


Figure 3a. Répartition par tranche d'âge et par organismes des personnels C et EC dans les unités du CNRS-INSU/OA.

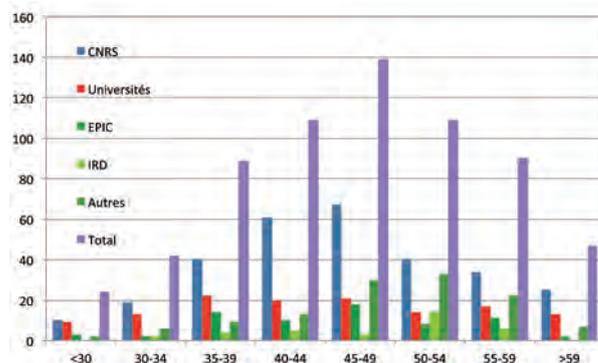


Figure 3b. Répartition par tranche d'âge et par organismes des personnels IT dans les unités INSU/OA.

Pour les IT, on observe, en comparaison à la précédente prospective, un vieillissement de la population avec un déplacement du pic de la tranche 40-44 vers la tranche 45-49. Cependant, la proportion de 55 ans et plus a un peu diminué, elle est passée de 25 % à 21 %. On observe par contre un manque de renouvellement des IT avec une population nettement plus faible dans la classe d'âge 30-34, essentiellement due aux IT CNRS dont le nombre a quasiment été divisé par deux dans cette classe.

• Chercheurs et enseignants-chercheurs

La population des Ch et EC permanents travaillant dans les unités du CNRS-INSU/OA et se considérant comme travaillant sur des thématiques OA représente 849 Ch et EC en 2016.

Sur ces 849 agents, les données détaillées sont manquantes pour 32 agents.

	DR	CR	Total	âge moyen
2015	137	132	269	47,5
2014	136	134	270	47,5
2013	129	143	272	46,9
2012	127	146	273	46,5
2011	124	149	273	46,4
2010	119	157	276	46,3
2009	111	165	277	46
2008	111	172	283	46,3
2007	111	169	280	46,3
2006	114	173	287	46,3
2005	111	175	286	46,3

Tableau 2. Évolution des chercheurs CNRS de la section 19 de 2005 à 2014 à partir des données des bilans sociaux du CNRS.

	PR	MCF	Total EC	CNAP	Total
2015	58	127	185	43#	228
2014	59	128	187	41*	228
2013	64	121	185	39	224
2012			188	38	226
2011			182	38	220
2010	61	117	178	37	215
2009	60	121	181	34	215
2008	56	121	177	32	209
2007	52	121	173	31	204
2006	54	116	170	25	195
2005	57	112	169	19	188
2004	56	110	166	17	183

Tableau 3. Évolution des enseignants-chercheurs de la section 37 entre 2004 et 2014. Les personnels CNAP sont également indiqués. Source : fiche démographique des sections du CNU et bilan de la section CNAP SCOA. Les cases hachurées correspondent à des données manquantes. (# dont 9 physiciens, * dont 8 physiciens)

Les bilans sociaux dorénavant disponibles dans les organismes publics permettent d'avoir une vision pluriannuelle des personnels Ch et EC du domaine OA : pour le CNRS à partir des chiffres de la section 19 (Tableau 2) et pour les universités,

à partir des chiffres de la section 37 du CNU et de la section SCOA du CNAP (Tableau 3).

Le Tableau 2 montre une diminution des chercheurs CNRS en section 19 avec une inflexion qui a commencé en 2007. De plus, l'âge moyen augmente montrant depuis 4 ans un vieillissement de la population. Ce constat rejoint celui fait par la section 19 dans son dernier rapport de conjoncture datant de 2014.

Le Tableau 3 montre une augmentation de la population des EC de la section 37 sur 10 ans, essentiellement entre 2004 et 2012.

On note une faible diminution des professeurs depuis 5 ans. Sur cette période de 10 ans, on constate la montée en puissance de la section SCOA du CNAP essentiellement entre 2004 et 2010, effet lié à sa création récente. Les services d'observation, même s'ils devraient être dotés de postes CNAP, ne le sont pas tous, alors que le besoin est croissant autour du changement climatique et de ses impacts, notamment sur l'environnement.

La problématique de l'évolution de carrière des MCF est posée du fait du faible nombre de postes de PR et de la difficulté d'accès au corps des DR CNRS (dont le concours bien qu'externe, est rarement accessible aux personnels non CNRS du fait de l'absence de support budgétaire à la création d'un poste).

Sur la période 2005-2015, le nombre de Ch en moins de la section 19 est de 17 en comparaison d'une augmentation de 18 EC de la section 37 et de 22 CNAP de la section SCOA sur la même période. Pour la section CNAP SCOA en 2015, 9 personnels sont sur des thématiques SIC assez éloignées de OA.

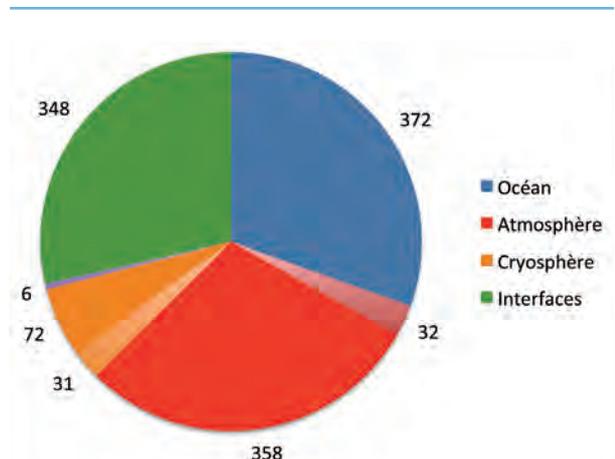


Figure 4. Nombre de fois où un domaine scientifique (océan, atmosphère, cryosphère et interfaces) a été mentionné par les Ch – EC de la communauté OA affectés dans les unités du CNRS-INSU/OA.

Le détail des domaines de recherche des Ch et EC montré Figure 4 indique que les domaines océan, atmosphère et interfaces sont cités un nombre de fois assez proches. Il faut noter qu'il est rare que le domaine interfaces soit indiqué seul.

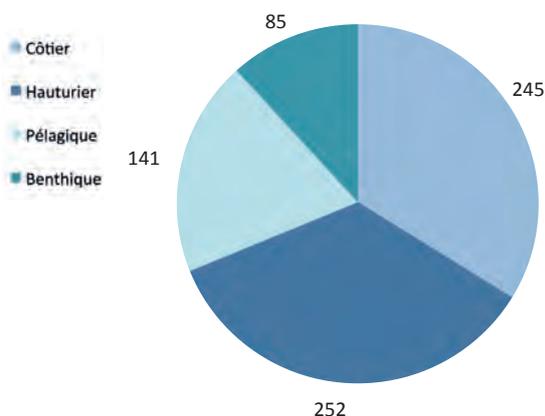
Le détail des sous-domaines montre que les études sur l'océan se concentrent sur les domaines côtier et hauturier ; que les études sur l'atmosphère s'intéressent préférentiellement à la couche limite et à la troposphère ; que les études sur la cryosphère sont en majorité sur la neige et la calotte et que les études sur les interfaces suivent une répartition très proche de celle des grands domaines de la Figure 4 pour océan, atmosphère et cryosphère. Pour les interfaces, on voit apparaître en plus les études sur les interfaces avec le continent qui sont plus proches des thématiques scientifiques

de la section 30 du CNRS (surfaces et interfaces continentales) ; quand le sous-domaine continent est cité, il est presque toujours accompagné du sous-domaine océan ou atmosphère du domaine principal interfaces.

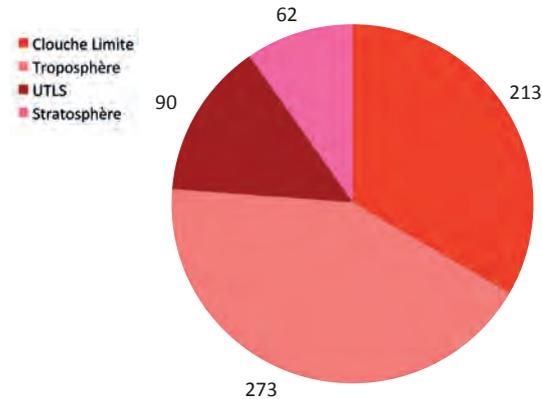
En termes d'approches, les études expérimentales et numériques dominent. Pour les données utilisées, on constate que les chercheurs du domaine OA utilisent principalement des données prises sur le terrain, suivi de données issues de simulations numériques. L'échelle de temps étudiée majoritairement est le présent. Pour les échelles spatiales, c'est la mésoéchelle qui domine, suivi de l'échelle globale. Les répartitions entre approches, types de données utilisées, échelles de temps et échelles spatiales sont similaires à celles observées lors de la précédente prospective.

Figure 4a, b, c, d. Nombre de fois où chaque sous-domaine d'étude des domaines principaux océan (a), atmosphère (b), cryosphère (c) et interfaces (d) a été mentionné par les Ch – EC de la communauté OA affectés dans les unités du CNRS-INSU/OA.

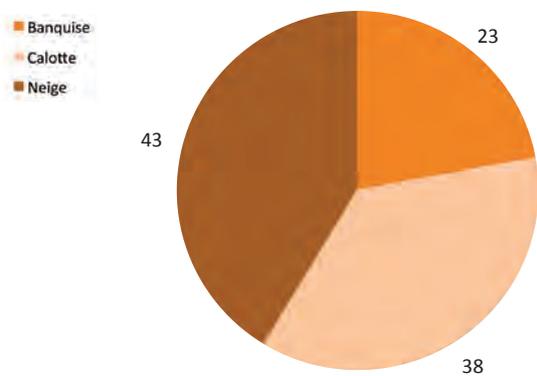
a) Océan



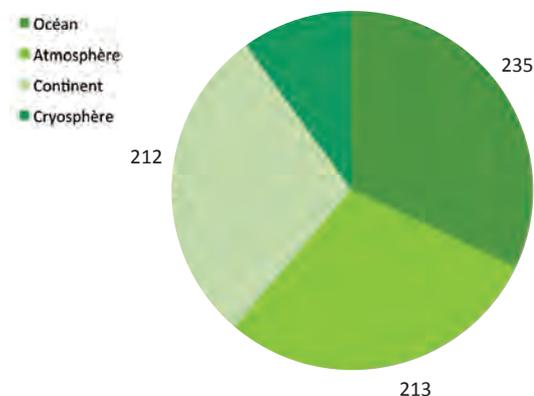
b) Atmosphère



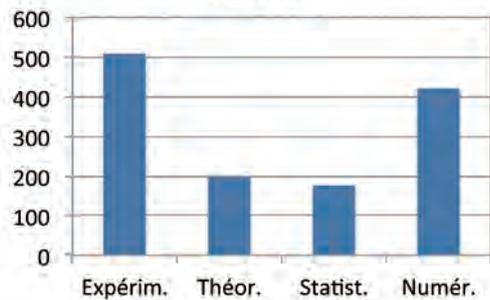
c) Cryosphère



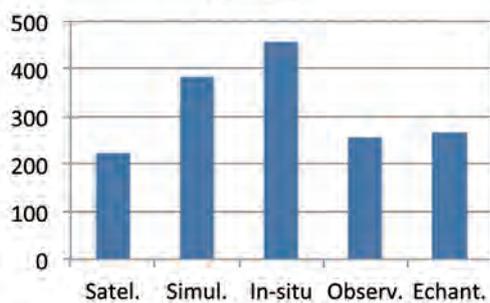
d) Interfaces



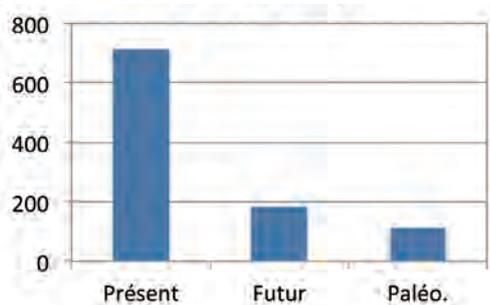
Approche



Données



Échelle de temps



Échelle spatiale

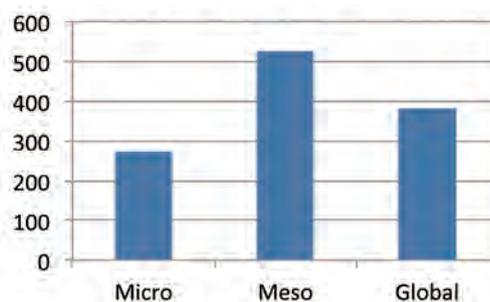
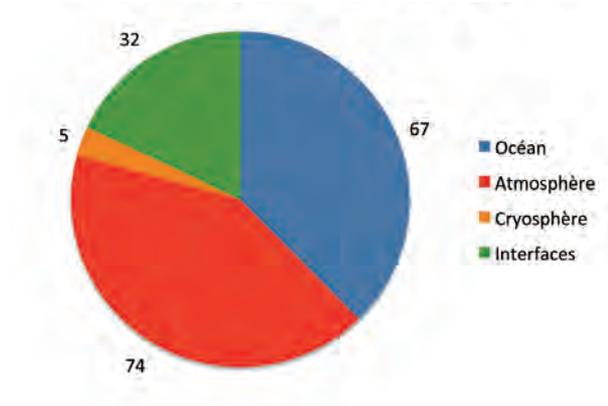


Figure 5. Approches, mode d'acquisition des données (observations: données issues de services d'observation), échelles temporelles et spatiales étudiées par les Ch – EC de la communauté OA des unités du CNRS-INSU/OA.

En juin 2016, le nombre de CDD chercheurs déclarés est de 187 (196 lors de la précédente prospective) à comparer à 849 permanents ce qui correspond à environ 18 % de CDD chez les chercheurs. Pour les CDD chercheurs, 8 unités dépassent 20 %. Notons que dans la suite de l'analyse, 2 unités ne sont pas incluses car les domaines et approches des CDD n'ont pas été renseignés.

Domaines d'étude simplifiés des CDD



Approche des CDD selon les domaines

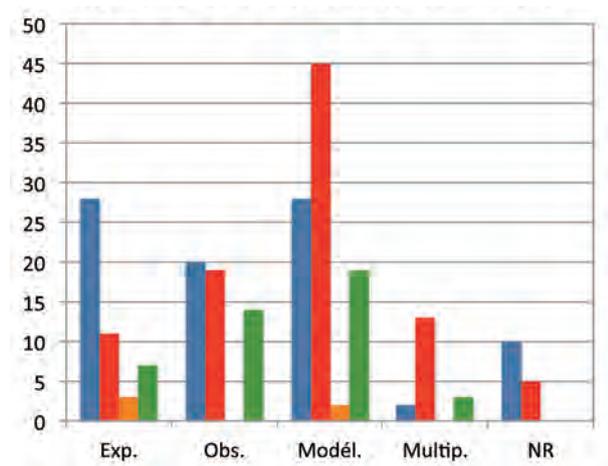


Figure 6. Domaines d'études et méthodes d'approche des CDD chercheurs du domaine OA en poste en juin 2016 dans les unités du CNRS-INSU/OA. NR pour non renseigné.

Pour les CDD, les domaines d'étude simplifiés ont une répartition différente des permanents (Figure 6). Cependant, pour les permanents, le terme interfaces est beaucoup cité avec un autre domaine principal alors que pour les CDD, il est le plus souvent cité seul. Ce biais ne permet donc pas une comparaison directe des répartitions de la Figure 4 et 6. Si l'on compare à la précédente prospective, on constate que si le domaine atmosphère est encore le plus cité, le domaine interfaces monte en puissance passant de 10 à 32. Concernant les approches utilisées par les CDD suivant le domaine d'étude, une part importante des CDD travaillent sur l'atmosphère en

utilisant la modélisation numérique, ce constat est identique à celui de la précédente prospective. Dans le domaine océanique, les approches expérimentales et de modélisation numérique sont utilisées à parts égales. On observe aussi un nombre important de CDD affectés à des tâches d'observation que ce soit dans le domaine océan, atmosphère ou interfaces. Pour les interfaces, c'est encore l'approche de modélisation numérique qui domine tout comme pour l'atmosphère avec une répartition entre les différentes approches similaires pour ces deux domaines.

• Personnels IT

Il y a un total de 649 IT dans les unités du CNRS-INSU/OA tous employeurs confondus, ce chiffre est stable par rapport à la précédente prospective (648).

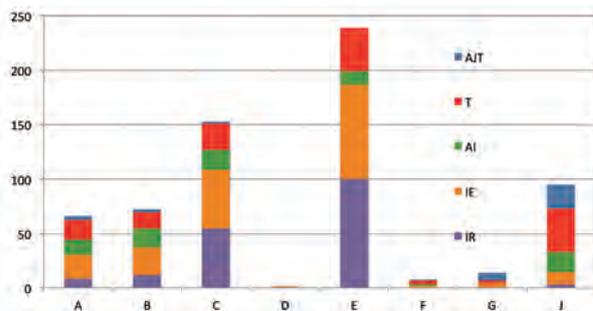


Figure 7a. Répartition par corps dans chaque BAP pour les IT permanents des unités du CNRS-INSU/OA quel que soit leur employeur. BAP A : sciences du vivant ; BAP B : sciences chimiques et sciences des matériaux ; BAP C : Sciences de l'ingénieur et instrumentation scientifique ; BAP D : sciences humaines et sociales ; BAP E : informatique, statistique et calcul scientifique ; BAP F : documentation, culture, communication, édition ; BAP G : patrimoine, logistique, prévention et restauration ; BAP J : gestion et pilotage.

Les BAP C et E dominent toujours la population des IT permanents avec une majorité d'IR et d'IE dans ces BAP (Figure 7a).

On observe, en comparaison avec la précédente prospective, un recul de la BAP C et dans une moindre mesure de la BAP J au profit des BAP E et B (Figure 7a). Ce recul de la BAP C avait déjà été constaté lors de la précédente prospective.

Mis à part les BAP G et E, la majorité des IT est au CNRS (Figure 7b gauche et droite). Pour la BAP E, le CNRS et Météo-France ont une contribution proche (Figure 7b droite). La contribution des universités reste inférieure à celle du CNRS et des autres organismes (Figure 7b gauche) même si elle a un peu augmenté depuis la précédente prospective, notamment au niveau IE. Cela semble indiquer un changement de politique de recrutement des universités qui traditionnellement recrutaient plutôt dans le corps de catégorie C (57 % de T et AJT lors de la

précédente prospective contre 50 % actuellement).

Au niveau CNRS, on constate une diminution de la population des IT permanents qui est maintenant inférieure à 300 (Figure 7b gauche).

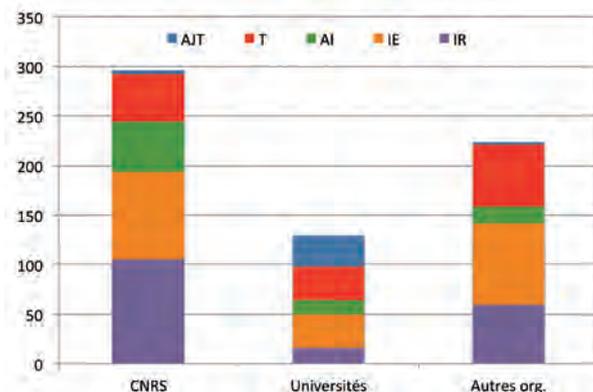
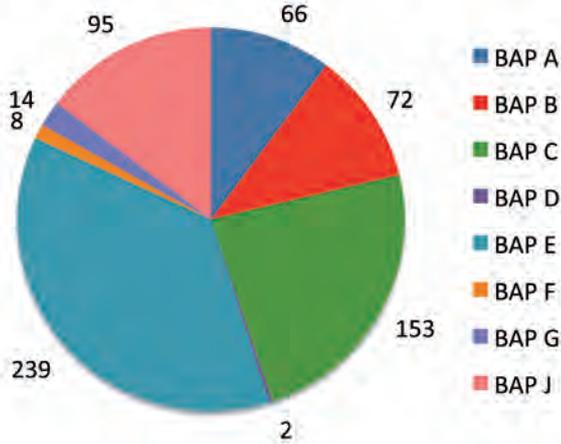


Figure 7b. À gauche, répartition par corps et par organismes d'appartenance des IT permanents des unités du CNRS-INSU/OA, à droite, répartition en pourcentage par BAP et par organisme d'appartenance des IT permanents des unités du CNRS-INSU/OA (Les BAP D et F qui représentent moins de 10 agents n'ont pas été représentées).

L'évolution observée lors de la précédente prospective de l'apparition d'une population très qualifiée en BAP J ne se poursuit pas, avec même un léger recul des IE et IR dans cette BAP ce qui correspond aux départs en retraite annoncés (Figure 7a). La question du meilleur positionnement de ce type de profils de poste a été discutée pendant le colloque : est-ce dans les unités que les IR BAP J pour la conduite de projets sont les mieux positionnés, ou est-ce plutôt dans les OSU et structures fédératives ?

D'une façon générale (Figure 7b gauche), on constate une augmentation des ingénieurs (AI, IE, IR) et un recul des T et AJT, les AJT ayant presque disparu excepté dans les universités sur la BAP J. Les IR sont en majorité en BAP E avec une proportion passant de 53 % lors de la précédente prospective à plus de 55 %. Cette tendance est probablement liée aux évolutions du calcul haute performance et des bases de données dans le contexte du « big data » avec visiblement l'absence de difficulté à recruter dans cette BAP au cours des 5 dernières années (population d'agents permanents ayant augmenté de 21). À l'inverse, on peut s'inquiéter de l'érosion de la BAP C où les recrutements ont apparemment été plus compliqués, 24 départs en retraite étaient prévus dans les 5 dernières années et le nombre d'agents a diminué de 25 (Figure 7a). Pour la BAP A, le nombre d'agents est resté quasi identique (+ 1 agent). Le nombre d'agents des BAP F et G a diminué, peut-être en lien avec un transfert de ces métiers vers les OSU ou les fédérations de recherche. Pour la BAP B, on observe une augmentation

a) IT tous organismes – 649 agents



b) CDD IT 161 agents

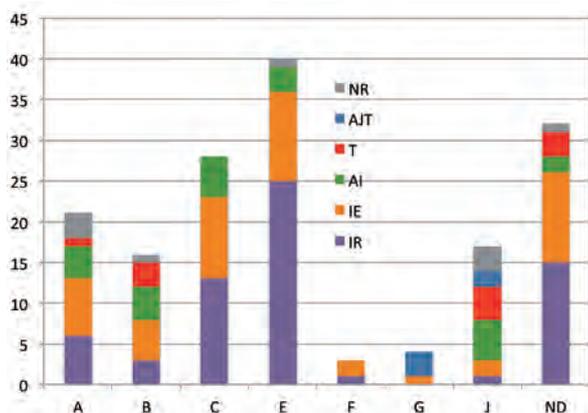
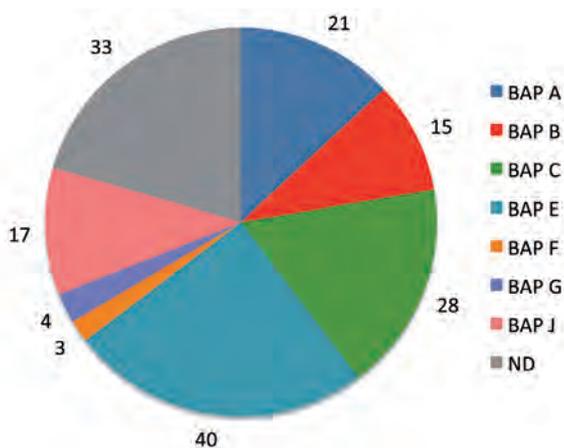


Figure 8. a) En haut à gauche répartition par branches d'activité professionnelle des IT permanents des unités du CNRS-INSU/OA ; b) en haut à droite répartition par branches d'activité professionnelle des IT CDD des unités du CNRS-INSU/OA en poste en juin 2016 ; c) en bas, répartition par corps dans chaque BAP pour les CDD IT des unités du CNRS-INSU/OA en poste en juin 2016. NR = non renseigné, ND = non déterminé.

importante des agents passant de 51 lors de la précédente prospective à 72, ces nouveaux agents sont majoritairement des IE CNRS. Cela peut s'expliquer par un besoin accru de la communauté en termes d'analyses chimiques.

La population des départs à la retraite potentiels (personnels âgés de 61 ans ou plus en 2016) dans les 5 prochaines années a été recensée : 1 départ en BAP A, soit 1,5% des effectifs ; 15 départs en BAP C, soit presque 10% des effectifs ; 3 départs en BAP B, soit 4,5% des effectifs ; 9 départs en BAP E, soit 2,5% des effectifs ; 9 départs en BAP J, soit 9,5% des effectifs. Ces chiffres montrent que les départs en retraite vont être faibles dans les années à venir, avec tout de même une attention particulière à avoir sur les BAP C et J qui vont perdre potentiellement 10% de leurs effectifs alors que ce sont les deux BAP qui ont déjà diminué durant les 5 dernières années.

Parmi les points abordés lors de la table ronde pendant le colloque, le vieillissement de la population, et notamment IT a été signalé comme un facteur d'aggravation du contexte général.

En juin 2016, le nombre de CDD IT déclarés est de 161 à comparer à 649 permanents soit près de 20% de CDD chez les IT. Pour 13 unités, la proportion de CDD chez les IT dépasse 20%. Lors de la précédente prospective, le nombre de CDD IT était de 138 à comparer à 648 permanents soit 17,5%. On constate donc une augmentation de la population IT totale avec une progression du nombre de CDD, d'autant plus que ce nombre est sous-évalué (cf. note de lecture). Notons qu'aucune information n'a été fournie sur la BAP de 33 CDD IT et que l'information sur le corps est manquante pour 9 agents. La répartition des BAP chez les CDD est assez proche de celle des permanents avec une majorité de BAP E. Les BAP C, A, J et B présentent des effectifs assez proches. Cette répartition est très différente de celle observée lors de la précédente prospective où la majorité des CDD IT était sur la BAP E (autour de 70).

L'augmentation du nombre de CDD dans les fonctions IT fait peser des risques sur le maintien des cœurs de compétence lorsqu'ils occupent des postes pérennes et font face à un « *turn over* » élevé lié au rythme de financement des projets.

Enfin, une analyse serait nécessaire pour identifier les CDD recrutés sur des activités nouvelles, une démarche potentiellement précurseuse d'évolution des métiers.

Focus : les CDD dans les SNO – enquête menée en 2014 par la CSOA

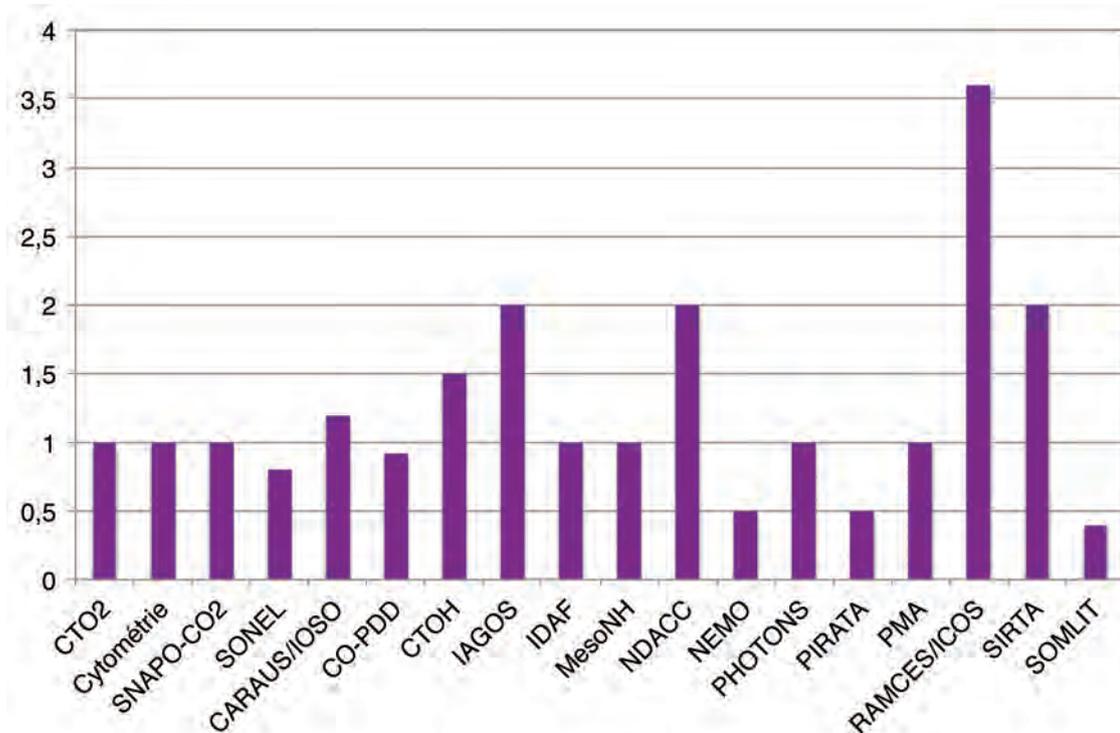


Figure 9. ETP considéré comme indispensable par les porteurs de services labélisés CNRS-INSU/OA, enquête menée par la CSOA en 2014.

En 2014, la CSOA a mené une enquête auprès des porteurs de services labélisés par le CNRS-INSU du secteur afin d'analyser le rôle des CDD dans le fonctionnement de ces services. À cette période, les services labélisés sont au nombre de 33. L'enquête a montré que sur ces 33 services, 21 avaient recours à des CDD pour faire fonctionner leur service. La figure 9 montre les ETP CDD des services (18 sur 21) considérant que les CDD sont indispensables pour leur fonctionnement dans le périmètre défini par la CSOA lors de leur labélisation. Ces 18 porteurs estiment que le recours à ces CDD est un problème pour la pérennité de leur service. De plus, ils sont 17 à déclarer avoir des problèmes liés au renouvellement de leur CDD que ce soit à cause de la règle des 4 ans, de la multiplicité des sources de financement ou de la difficulté à attirer des candidats correspondant à la qualification demandée.

■ Recommandations

Une majorité des recommandations de la précédente prospective sont toujours d'actualité, à savoir :

Constat :

- Absence de base centralisée complète et maintenue à jour des personnels permanents incluant les métiers des IT et les domaines de recherche des Ch-EC.
- Informations sur les CDD et suivi de ces personnels très parcellaires.

Recommandation 1 : Profiter du remplacement en cours de l'application LABINTEL par RESEDA au CNRS pour avancer sur ces deux points.

Constat : Recours important à des personnels CDD avec un potentiel «risque de perte de compétences ou de connaissances», impactant fortement les projets à long terme.

Recommandation 2 : Identification dans chaque unité des CDD remplissant une fonction pérenne.

Constat : la crainte d'une baisse de recrutement des IT en BAP C exprimée lors de la précédente prospective s'est avérée fondée. Les chiffres montrent de plus que c'est la BAP C qui va perdre le plus de personnels du fait des départs en retraite dans les 5 prochaines années (près de 10% des effectifs).

Recommandation 3 : Assurer un meilleur niveau de recrutement d'IT en BAP C.

Toujours au regard des recommandations de la précédente prospective, on constate un progrès sur la contribution des partenaires aux personnels IT avec une baisse de l'écart entre les nombres d'IT CNRS et universitaires. Cependant, cette baisse s'explique par une augmentation des personnels IT universitaires, notamment chez les IE, ce dont on ne peut

que se réjouir, mais également par une diminution du nombre d'IT CNRS dans les unités du CNRS-INSU/OA.

Cette comparaison avec la précédente prospective et le recueil de données présenté amènent la communauté aux recommandations globales suivantes :

Recommandation 4 : Maintenir le niveau des personnels IT permanents.

Recommandation 5 : Développer dans les unités une stratégie d'emploi en se basant sur les recommandations 1 et 2 ci-dessus en intégrant une vision à moyen et long terme à l'échelle au minimum d'un contrat quinquennal.

Recommandation 6 : Étudier les possibilités innovantes de recrutement ouvertes par la loi sur l'économie sociale et solidaire *via* des structures coopératives d'intérêt collectif comme les Coopératives d'Activité et d'Emploi.

Recommandation 7 : Donner la possibilité aux jeunes chercheurs non permanents de déposer des projets de recherche en leur nom.

Recommandation 8 : Identifier parmi les CDD, ceux qui sont des fonctions nouvelles et préfigurent, donc, l'émergence de nouvelles thématiques et/ou techniques.



ANNEXES

Listes des services nationaux OA

Services nationaux d'observation

INDAAF	International Network of Deposition and Atmospheric chemistry in Africa
IAGOS	In service Aircraft for a Global Observation System
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
PHOTONS/AERONET	Observatoire de Recherche sur les Aérosols
ICOS	Integrated Carbon Observation System
CLAP	CLimate relevant Aerosol Properties from near surface observations
CARAUS	Carbone Austral
MOOSE	Mediterranean Ocean Observing System on Environment
SSS	Service d'Observation de la Salinité des Océans (Sea Surface Salinity)
SOMLIT	Service d'Observation en Milieu Littoral
PIRATA	Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic
MEMO	Mammifères Échantillonneurs du Milieu Océanique
SONEL	Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales
Argo-France	
CORAIL	

Codes numériques communautaires

MESO-NH	Mesoscale non-hydrostatic model
NEMO	Nucleus for European Model of the Ocean
CHIMERE	chemistry-transport model for atmospheric composition
SIROCCO	Simulation Réaliste de l'OCéan COtier

Centre de traitement et d'archivage des données

CTOH Centre de Topographie des Océans et de l'Hydrosphère

Sites nationaux instrumentés

SIRTA Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique
CO-PDD Site d'Observations atmosphériques Puy-de-Dôme/Opme/Cézeaux
MAÏDO observatoire atmosphérique du MAÏDO à La Réunion
CRA Lannemezan Centre de Recherches Atmosphériques

Services nationaux d'analyse

SAPIGH Service d'Analyses de Pigments par HPLC
SNAPO-CO2 Service National d'Analyse des Paramètres Océaniques du CO2

Instruments Nationaux

CESAM Chambre Expérimentale de Simulation Atmosphérique Multiphasique
Moyens Mobiles de Mesures Météorologiques
Plateforme aéroportée

Composition de la FOF

- six navires globaux ou régionaux (Marion Dufresne, Pourquoi pas?, L'Atalante, Thalassa, Antea et Alis) capables de réaliser des campagnes océanographiques sur tous les océans. De 30 à 120 mètres de long, ils sont capables d'effectuer des levés bathymétriques des fonds marins, de déployer des systèmes sous-marins profonds afin de prélever des échantillons, de réaliser des mouillages, des prélèvements dans des colonnes d'eau, de réaliser des mesures navire en route (météorologie, courantométrie, sondeurs acoustiques, etc.) et d'effectuer des carottages sédimentaires ;

- des engins sous-marins profonds, uniques en Europe, comme le sous-marin Nautilo ou le robot télé-opéré Victor 6000 capables de travailler à 6000 mètres de profondeur, des sonars remorqués, des équipements de sismique multitraces et des outils de prélèvement. Ils peuvent être mis en œuvre depuis la majorité des navires hauturiers ;

- cinq navires côtiers (Europe, Thalia, Côtes de la Manche, Téthys II et Haliotis) utilisés en Manche-Atlantique et en Méditerranée qui permettent la réalisation de campagnes scientifiques nombreuses et variées avec une capacité à assurer un continuum de moyens entre le littoral et le hauturier (NB : l'Haliotis peut être embarqué sur les gros navires pour réaliser des campagnes côtières et littorales légères dans des zones hors façades métropolitaines) ;

- sept navires de station, capables de réaliser des sorties de la journée à trois jours pour les plus récents répartis sur les façades maritimes métropolitaines : Albert Lucas (Brest), Antedon II (Marseille), Neomysis (Roscoff), Néréis (Port-Vendres), Planula IV (Arcachon), Sagitta III (Villefranche), Sépia II (Wimereux).

À compter de 2016, l'Astrolabe est rattaché à la TGIR Concordia. Après évaluation par les commissions, il continuera cependant à faire l'objet de transits valorisés, à servir des SNO (SSS, CARAUS) et à être utilisé pour des campagnes côtières une dizaine de jours par an, si les conditions de glace de mer le permettent.

Acronymes

3MI	Multiangle, multispectral, multipolarisation instrument
AI	Assistant ingénieur
AJT	Adjoint technique
ALADIN	Aire limitée, adaptation dynamique, développement international
AMSU	Advanced microwave sounding unit
ANR	Agence nationale de la recherche
ANTARES	Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research
ARN/ADN	Acide ribonucléique / acide désoxyribonucléique
AROME	Applications de la recherche à l'opérationnel à méso-échelle
ARPEGE	Action de recherche petite échelle grande échelle
A-TRAIN	Afternoon train
AUV	Autonomous underwater vehicle
BAP	Branches d'activité professionnelle
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
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
C2FN	Centre de carottage et de forage national
CALIOP	Cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization
CALIPSO	Cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations
CARIOCA	Carbon interface ocean atmosphere buoy
CAROLS	Cooperative airborne radiometer for ocean and land studies
CCRT	Centre de calcul recherche et technologie
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEAS	Cavity enhanced absorption spectroscopy
CEFREM	Centre de formation et de recherche sur l'environnement marin
CEPMET	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
GERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CESAM	Chambre expérimentale de simulation atmosphérique multiphasique
CHAT	Chimie atmosphérique
CHIMERE	Modèle atmosphérique de chimie-transport et dépôt
CIO	Comité interorganisme

CLIC	Climate and cryosphere
CLIVAR	Climate variability
CNAP	Conseil national des astronomes et physiciens
CNES	Centre national d'études spatiales
CNRM	Centre national de recherches météorologiques
CNRS-IN2P3	Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
CRDS	Cavity ring-down spectroscopy
CYBER	Cycles biogéochimiques, environnement et ressources
DT	Direction technique
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EPIC	Établissement public à caractère industriel et commercial
EPOC	Environnements et paléo-environnements océaniques
EPOS	European plate observing system
EPS-SG	EUMETSAT polar system - Second generation
EPST	Établissement public à caractère scientifique et technique
ESA	European spatial agency
ESF	European science foundation
EUFAR	European facility for airborne research
EUMETSAT	European organization for the exploitation of meteorological satellites
EUSAAR	European supersites for atmospheric aerosol research
FOF	Flotte océanographique française
GENCI	Grand équipement national de calcul intensif
GECKO-A	Generator for explicit chemistry and kinetics of organics in the atmosphere
GEOTRACES	Geochemical traces
GEWEX	Global energy and water cycle experiment
GIEC	Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat
GLACIOCLIM	Les glaciers, un observatoire du climat
GMES	Global monitoring for environment and security
GMMC	Groupe mission Mercator Coriolis
GOSAT	Greenhouse gases observing satellite
GPS	Global positioning system
HITRAN	High-resolution light transmission molecular absorption database
IASI	Infrared atmospheric sounding interferometer
IATOS	Ingénieurs, administratifs, techniciens et ouvriers de service
IDRIS	Institut du développement et des ressources en informatique scientifique
IE	Ingénieur d'études
IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
IGAC	International global atmospheric chemistry
IGBP	International geosphere-biosphere program
IMAGES	International marine past global change study
IMAGO	Interactions multiples glace, atmosphère, océan

IMBER	Integrated marine biogeochemistry and ecosystem research
IMMEC	Infrastructure for measurements of the European carbon cycle
INRA	Institut national de la recherche agronomique
IPEV	Institut polaire français Paul-Émile Victor
IPICS	International partnership for ice core science
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace
IR	Ingénieur de recherche
IRD	Institut de recherche pour le développement
IT	Ingénieur ou technicien
LA	Laboratoire d'aérodynamique
LACY	Laboratoire de l'atmosphère et des cyclones
LAMP	Laboratoire de météorologie physique
LEFE	Les enveloppes fluides et l'environnement
LEGOS	Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales
LGGE	Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement
LISA	Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques
LMDz	Laboratoire de météorologie dynamique zoom
LOA	Laboratoire d'optique atmosphérique
LOCEAN	Laboratoire d'océanographie et du climat : expérimentations et approches numériques
LOG	Laboratoire d'océanologie et de géosciences
LOICZ	Land ocean interactions in the coastal zone
LOMIC	Laboratoire d'océanographie microbienne
LOPS	Laboratoire Océanographie Physique et Spatiale
LOV	Laboratoire d'océanographie de Villefranche
LSCE	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement
MANU	Méthode Mathématiques et Numériques
MAR	Modèle atmosphérique régional
MEDDE	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie
MESR	Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche
METOP	Meteorological operational satellite
MISTRALS	Mediterranean integrated studies at regional and local scales
MOCAGE	Modèle de chimie atmosphérique à grande échelle
MOOSE	Mediterranean ocean observing system on environment
MOZAIC	Measurements of ozone and water vapour by in-service Airbus aircraft
NEMO	Nucleus for European modelling of the ocean
NEMOVAR	NEMO variationnel
OPA	Océan parallélisé
OPTIMISM	Observation dynamical and thermodynamical processes involved in the sea ice mass balance for <i>in situ</i> measurements
ORME	Observatoire régional méditerranéen sur l'environnement
OSU	Observatoire des sciences de l'Univers

PARASOL	Polarisation et anisotropie des réflectances au sommet de l'atmosphère
PMF	Positive matrix factorisation
PNTS	Programme national de télédétection spatiale
PRACE	Partnership for advanced computing in Europe
PROLIPHYC	Prolifération phytoplanctonique – application aux cyanobactéries
RALI	Radar - Lidar
RENATER	Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche
SAFIRE	Service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement
SAPHIR	Sondeur atmosphérique du profil d'humidité intertropicale par radiométrie
SDLA	Spectromètre à diodes laser accordables
SMOS	Soil moisture and ocean salinity satellite
SMOSMANIA	Soil moisture observing system - meteorological automatic network integrated application
SNOCO	Service national d'océanographie côtière opérationnelle
SO	Service d'observation
SOERE	Systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
SOLAS	Surface ocean - lower atmosphere study
SPIRALE	Spectroscopie infrarouge par absorption de laser embarqué
SSM/I/S	Special sensor microwave imager / Sounder
SURFEX	Surface externalisée
SWATMEX	Soil water and temperature in Mediterranean experiment
SWOT	Surface water ocean topography
T	Technicien
TAAF	Terres australes et antarctiques françaises
TOPEX/Poseidon	The ocean topography experiment / Poseidon
TOSCA	Terre, océan, surfaces continentales et atmosphère
UMI	Unité mixte internationale
UMR	Unité mixte de recherche
UMS	Unité mixte de service
URA	Unité de recherche associée
VMP	Vertical mixing profiler
WCRP	World climate research program
XBT	Expendable bathythermograph

Coordination éditoriale

Dominique Armand (CNRS-INSU)

Impression

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



Conception

Trait de caractère(s)

Maquette

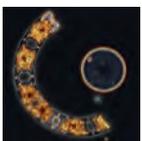
Page B

Octobre 2017

■ Légendes de la mosaïque de couverture



Bathysonde ramenée à bord au large du Groenland. © Ifremer / Ovide 2002



Observation microscopique de micro-algues antarctiques. Elles sont un des acteurs majeurs de la pompe biologique de carbone dans l'océan. © Mathieu Rembauville



Émission simultanée de cinq faisceaux lasers, depuis l'observatoire du Maïdo situé à 2 200 m d'altitude, sur la côte ouest de l'île de la Réunion. Ces lasers permettent de mesurer l'ozone, les aérosols, la vapeur d'eau et la température. © Thibaut Vergoz, OSU-Réunion/CNRS Photothèque



Prélèvement d'une carotte de glace lors des tests du prototype de la sonde expérimentale Mini-Subglacior, sur la base Concordia, en Antarctique. La sonde permettra d'explorer la glace jusqu'à 3 km de profondeur pour obtenir des enregistrements climatiques des dernières 1,5 millions d'années.
© Thibaut Vergoz, IPEV/LGGE/CNRS Photothèque

The CNRS logo consists of the lowercase letters 'cnrs' in a white, sans-serif font, positioned inside a dark blue circle. This circle is itself centered within a larger, white circle that overlaps the dark blue header bar at the top of the page.

cnrs

Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers