



Prospective océan-atmosphère 2023-2028

Jean-François Doussin, Thibault de Garidel-Thoron, Anne Brès, Nicolas Arnaud, Pascale Lherminier, Sandrine Bony, Sébastien Payan, Cyrille Flamant, Xavier Capet, Patrick Chazette, et al.

► To cite this version:

Jean-François Doussin, Thibault de Garidel-Thoron, Anne Brès, Nicolas Arnaud, Pascale Lherminier, et al.. Prospective océan-atmosphère 2023-2028. Institut National des Sciences de l'Univers. 2023, 135p. <hal-04334125>

HAL Id: hal-04334125

<https://hal.science/hal-04334125v1>

Submitted on 10 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



PROSPECTIVE

OCÉAN-ATMOSPHÈRE 2023-2028

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Prospective océan-atmosphère 2023-2028

**SYNTHÈSE DES ATELIERS DU COLLOQUE DE SYNTHÈSE DE PROSPECTIVE DU DOMAINE
OCÉAN-ATMOSPHÈRE (OA) DES 10-13 JANVIER 2023 À AUTRANS ET DES GROUPES
DE TRAVAIL PRÉPARATOIRES**

Sous la coordination de Jean-Francois Doussin – Directeur adjoint scientifique Océan-Atmosphère de l'INSU
et Thibault de Garidel-Thoron – Président de la CSOA.

Coordination éditoriale

Anne Brès

Impression

CNRS DR1 IFSEM secteur de l'imprimé

Conception / Maquette

CBA Design / Page B

Juillet 2023

Photo de couverture : © Jérôme Riedi /LOA

Membres de la CSOA

S. Bony (LMD), X. Capet (LOCEAN), P. Chazette (LSCE), U. Christaki (LOG), F. Couvreur (CNRM), C. Delon (LAERO), G. Dufour (LISA), *secrétaire scientifique*, G. Durand (IGE), E. Freney (LAMP), *instrumentation*, K. Law (LATMOS), P. Lherminier (LOPS), R. Morrow (LEGOS), *observation*, E. Sanchez-Gomez (CERFACS), S. Payan (LATMOS), J. Riédi (LOA), N. Savoye (EPOC), T. Wagener (MIO), T. de Garidel-Thoron (CEREGE), *président*.

Membres des groupes de travail et animateurs d'ateliers

N. Allegri-Martiny, G. Alory, F. Ardhuin, N. Ayoub, S. Barillon, S. Bastin, S. Becerra, S. Bekki, M. Benavides, S. Bertin, X. Bertin, T. Biard, P. Bonneton, L. Bopp, A. Bosse, L. Bouilloud, C. Boulart, D. Bouniol, A. Bourdon, B. Bourles, F. Bourrin, P. Bouruet-Aubertot, P. Bousquet, A. Carbonnère, D. Cardinal, C. Cassou, B. Castelle, V. Catoire, J.-P. Chaboureau, I. Chiappello, M. Cirtog, F. Colas, I. Coll, L. Coppola, S. Cravatte, P. Cuny, Y. Cuypers, F. d'Ovidio, B. Danna, C. David-Beausire, C. Deanjean, L. Debreu, L. Deguillaume, C. Delavergne, M. Delmotte, D. Desbruyères, A. Deschamps, J. Deshayes, A. Doglioli, A. Dommergue, D. Doxaran, Y. Drillet, P. Drobinsky, T. Dubos, J.-C. Dutay, C. Fernandez, G. Forêt, P. Formenti, F. Gazeau, E. Goberville, G. Grégori, J. Gula, M. Haeffelin, L.-E. Heimbürger, S. Herbet, M. Herrmann, F. Houllbreque, F. Huynh, I. Jalón Rojas, C. Jamet, L. Jardillier, C. Jeandel, S. Joussaume, A. Koch-Larrouy, S. Kotthaus, N. Jourdain, S. L'Helguen, F. Lacan, N. Lahaye, Paolo Laj, N. Le Dantec, V. Le Fouest, J. Le Sommer, P.-Y. Le Traon, G. Leduc, A. Lefebvre, J.-F. Léon, M. Lévy, J. Llido, W. Llovel, D. Loustau, A. Lorrain, C. Maes, G. Mailhot, P. Marchesiello, V. Maréchal, B. Marticorena, V. Masson, S. Morin, R. Msadek, E. Ortega-Retuerta, J. Paillet, T. Penduff, P. Penven, P. Polensaeere, S. Pouliquen, C. Rabouille, K. Ramage, M. Ramonet, V. Riffault, L. Rivier, N. Rochetin, J.-F. Rontani, Y. Ropert-Coudert, D. Salas, K. Sartelet, M. Saunoy, S. Sauvage, J. Schäfer, F. Schmitt, R. Séférian, A. Sentchev, D. Serça, S. Somot, A. Sottolichio, S. Speich, J. Sudre, D. Swingedouw, K. Tachikawa, A. Tantet, P. Testor, V. Thierry, V. Thouret, G. Uzu, J. Vialard, E. Villenave, K. Von Schuckmann, D. Voisin, I. Xueref-Rémy

Membres de l'INSU

B. Ben Hassen, P. Braconnot, C. Delacourt, J.-F. Doussin, M.-N. Houssais, F. Lohou, C. Flamant, I. Obernosterer, F. D'Ortenzio, F. Parol, C. Tamburini, L. Sedaine.

Participants au colloque de synthèse d'Autrans

M. Ardyna, M. Bador, S. Barrillon, C. Barthe, F. Bassinot, L. Beaufort, M. Beekmann, M. Benavides, S. Benhaddou, G. Berthet, T. Biard, J. Boé, S. Bony, D. Bouniol, A. Bourdon, F. Bourrin, P. Bousquet, J. Boutin, P. Braconnot, P. Bretel, X. Capet, M. Carré, A. Carrier, V. Catoire, C. Compère, W. Chen, I. Chiapello, U. Christaki, P. Coll, L. Coppola, S. Coquillat, C. Cornet, F. Couvreur, P. Cuny, A. Dabas, V. Daële, B. d'Anna, C. David-Beausire, T. de Garidel-Thoron, C. Delon, F. d'Ortenzio, J.-F. Doussin, P. Dubuisson, G. Dufour, G. Durand, C. Fernandez, C. Flamant, P. Formenti, J.-J. Fourmond, N. Fourrié, E. Freney, C. Gaimoz, V. Gaullier, F. Gazeau, C. George, H. Giordani, S. Godin-Beekmann, G. Grégori, L. Guidi, C. Guieu, E. Guilyardi, M. Haefelin, M. Herrmann, M.-N. Houssais, N. Huret, C. Jamet, L. Jardillier, C. Jeandel, F. Jégou, F. Karbou, M. Khodri, F. Klingelhoefer, A. Kukui, T. Labasque, F. Lacan, P. Laj, K. Law, F. Le Moigne, J. Le Sommer, F. Leblanc, G. Leduc, A. Lefebvre, F. Lemarié, J.-F. Léon, P. Lherminier, Q. Libois, F. Lohou, C. Mari, F. Marin, B. Marticorena, S. Martini, M. Mc Gillen, W. Mellouki, L. Menut, E. Michel, V. Michotey, J. Mignot, M.-P. Moine, A. Molcard, A. Monod, B. Moriceau, S. Morin, R. Morrow, R. Msadek, E. Ortega-Retuerta, F. Pantillon, F. Parol, Nicolas Pascal, S. Payan, B. Picquet-Varrault, N. Poisson, M. Pontaud, O. Pringault, E. Pulido, S. Rabouille, M. Ramonet, P. Rampal, J.-L. Redelsperger, C. Reylé, J. Riedi, C. Rio, C. Ritz, M. Riva, L. Rivier, D. Roche, N. Rochetin, H. Roquet, G. Rouillet, D. Salas y Melia, J.-B. Sallée, G. Sarthou, S. Sauvage, N. Savoye, F. Schmitt, D. Sciamarella, K. Sellegri, G. Siour, A. Sottolichio, S. Speich, J. Sudre, K. Tachikawa, C. Tamburini, V. Thierry, V. Thouret, G. Uzu, J. Van Baelen, J. Vidot, E. Villenave, D. Voisin, C. Waelbroeck, T. Wagener, H. Wortham, I. Xueref-Remy.

Participants au Forum

K. Adeline, G. Alory, G. Ancellet, H. Angot, B. Barret, C. Barthe, F. Bassinot, M. Beekmann, S. Bekki, A. Bel Madani, M. Benavides, A. Berchet, A. Bianco, S. Blain, J. Blanchet, P.-H. Blard, M. Bocquet, A. Borbon, A. Bosse, D. Bouniol, F. Bourrin, P. Bousquet, J. Boutin, P. Braconnot, J. Brajard, M. Brigante, H. Brogniez, G. Broquet, G. Capitaine, T. Cariou, M. Carré, J.-P. Chaboureau, P. Chelin, H. Chepfer, M. Chiriaco, P. Ciais, H. Claustre, C. Clerbaux, Équipe EST CNRM, Y. Cohen, A. Colette, A. Colomb, A. Coman, C. Compère, Thème scientifique de l'IPSL Composair, L. Coppola, C. Cornet, J. Cuesta, B. d'Anna, V. Dansereau, C. de Laverne, E. Defer, L. Deguillaume, C. Delire, GDR DEPHY, B. Deremble, G. Descombes, A. Dommergue, H. Douville, P. Drobinski, S. Duchamp-Alphonse, F. Dulac, V. Echevin, F. Eynaud, A. Farchi, O. Fauvarque, L. Ferro-Famil, J. Fin, P. Fisicaro, C. Flamant, S. Fleury, P. Formenti, A. Fortems-Cheiney, F. Frappart, G. Gastineau, M. George, C. George, P. Gernez, F. Gheusi, S. Godin-Beekmann, A. Gratien, V. Gros, V. Guemas, V. Guidart, E. Guilyardi, D. Hauglustaine, F. Hourdin, N. Huret, R. Jolivet, J. Jouanno, J. Kammer, Y. Kerr, S. Khaykin, N. Kolodziejczyk, I. Kononov, P. Laj, A. Landais, R. Lapere, M. Le Menn, G. Leduc, D. Lefèvre, B. Legras, F. Lemoigne, M. Leriche, W. Llovel, R. Lopez Lozano, G. Mailhot, S. Mailler, B. Malaizé, M. Mallet, O. Marc, L. Marelle, F. Marin, S. Martini, F. Ménard, L. Menut, P. Messina, A. Minghelli, A. Monod, S. Morin, L. Mortier, C. Mouchel-Vallon, C. Muller, P. Nabat, D. Nérini, V. Noël, L. Olivier, C. Ottlé, Livre Blanc Paléoclimat et Paléoenvironnement, J.-D. Paris, A. Pazmino, E. Perraudin, N. Philippon Blanc, I. Pison, A. Podglajen, J. Polcher, P. Rampal, J.-C. Raut, J.-L. Redelsperger, E. Rémy, N. Reul, G. Reverdin, D. Ricard, C. Rio, M. Riva, L. Rivier, R. Roca, N. Rochetin, N. Rodríguez-Fernández, R. Röhrig, C. Rommeveau, J.-B. Sallée, F. Salvétat, K. Sartelet, B. Sauvage, S. Sauvage, F. Schmitt, P. Sellitto, A. Sorensson, O. Sulpis, A. Supply, D. Swingedouw, M. Tedetti, P. Testor, V. Thierry, J. Thomas, V. Thouret, C. Thouvenin-Masson, P. Tulet, S. Turquety, J. Uitz, P. Vanderbeeken, J. Vialard, E. Villenave, F. Vivier,

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	6
INTRODUCTION	8
Méthode prospective	8
BILAN 2017-2022	10
Les grands thèmes fondateurs du domaine Océan-Atmosphère.	11
Les enveloppes océan/atmosphère/cryosphère dans une vision intégrée du système Terre ¹ : cycles et interfaces	18
Les nouvelles frontières avec le vivant	24
Études régionales intégrées	26
Instrumentation, développements	30
Bilan bibliométrique 2017-2022	36
Moyens financiers	44
DÉFIS SCIENTIFIQUES EN OCÉANATMOSPHÈRE : COMPRENDRE ET PRÉVOIR LE SYSTÈME CLIMATIQUE, EN TRANSITION D'UN ÉTAT NATUREL À INTÉGRALEMENT ANTHROPIsé	48
Défi « Variabilités, tendance et points de bascule du système climatique »	50
Défi « Événements extrêmes : caractériser, comprendre et anticiper »	58
Défi « Convection atmosphérique »	65
Défi « Diversité du vivant et biogéochimie »	71
Défi « Anthropisation des milieux & pollutions »	75
Défi « Couplages et interactions d'échelles »	79
AIRES PRIORITAIRES	83
Urbain	84
Zones tropicales et intertropicales	88
Polaire	93
Continuum continent-océan	98
MISE EN ŒUVRE	102
Efficacité et sobriété	103
Éthique et engagement	105
Développer une instrumentation innovante	107
Numérique et modélisation	115
Structuration	120
Sciences, société et transdisciplinarité	130
Formation	132

Avant-propos

Placé au sein du CNRS, l'Institut national des sciences de l'Univers a pour mission d'élaborer, de développer et coordonner en France les recherches d'ampleur nationale et internationale en astronomie, sciences de la Terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace. Cette mission s'appuie notamment sur la consultation de la communauté scientifique, de nos partenaires institutionnels et académiques pour discuter la trajectoire de la recherche en sciences de l'Univers et du système Terre.

Comme tous les domaines de la recherche scientifique, les sciences de l'Univers et du système Terre ont pour mission de produire de la connaissance et pour cela de développer des savoirs et des savoir-faire. Elles doivent aussi contribuer à la transmission de ces connaissances et compétences, notamment avec nos partenaires universitaires mais aussi par la divulgation en direction de divers porteurs d'enjeux : société civile, décideurs et monde économique.

Cependant, par les objets auxquels elles s'intéressent, par les enjeux sociétaux sans précédents qu'ils recouvrent, les sciences de l'Univers et du système Terre – et singulièrement les sciences de l'atmosphère, de l'océan et du climat – doivent aussi s'organiser pour observer notre environnement sur le long terme, pour coordonner les moyens lourds que les échelles de temps et d'espace de nos objets exigent, pour donner du sens aux interrogations des citoyens et finalement pour accompagner la décision publique.

Les perspectives du domaine océan-atmosphère sont des moments essentiels de cet alignement de nos communautés sur ses objets de recherche mais aussi sur ses responsabilités sociétales.

Le domaine « océan-atmosphère » du CNRS-INSU mène ainsi régulièrement un exercice de prospective en lien avec les laboratoires, les Observatoires des sciences de l'Univers (OSU) et les infrastructures de recherche (IR) de son périmètre. En ligne avec la mission nationale de l'Institut, cet exercice ne constitue pas la prospective du seul CNRS en ce domaine mais celle de toute la communauté. Elle implique donc les organismes partenaires du CNRS-INSU : Météo-France, IRD, Cnes, Ifremer, Ademe, Shom, CEA, Inria mais aussi le CNRS-INC ont pu ainsi pleinement contribuer à la réflexion collective.

L'exercice dont le présent document fait la synthèse s'est appuyé sur plus de 20 réunions de la Commission spécialisée océan-atmosphère (CSOA), l'audition des directeurs de 21 laboratoires, 2 colloques d'action de LEFE dédiés, un forum en ligne qui a rassemblé 128 contributions (dont plusieurs collectives) et 16 groupes de travail.

L'objectif de ces exercices est double : tout d'abord, établir un état de la science et des moyens ; ensuite, définir les enjeux et les priorités, scientifiques ou instrumentales, du futur et les moyens qui garantiront leur mise en œuvre.

Sans nécessairement se prédéterminer dans une position en rupture, force est de constater que des progrès substantiels ont été réalisés sur des thématiques-phares de nos communautés tels que l'anthropisation des compartiments du système Terre, l'approche intégrée des grands cycles et des interfaces, ou l'approche régionale des verrous de connaissances. Toutefois, des avancées telles que celles concernant les nouvelles frontières avec le vivant, la fusion modèle-données ou encore la quantification des incertitudes dans les projections, par exemple, nécessitent d'être réinterrogées. Par ailleurs, de l'intelligence artificielle aux OMICS en passant par les capteurs miniaturisés ou le calcul haute performance, ces dernières années ont vu l'arrivée à maturité de moyens d'investigations nouveaux qui bousculent nos pratiques, ouvrent, en même temps, des champs nouveaux et apportent des méthodologies innovantes.

Enfin, l'écosystème de financement, de déploiement et de structuration de nos actions de recherches s'est encore profondément modifié ces dernières années, rendant indispensable de questionner à nouveau la raison d'être de nos structures et de nos dispositifs et leur adaptation aux priorités de de l'Etat et à l'émergence de grands programmes et de financement de la recherche que sont, par exemple, les PPR, les PEPR...

L'exercice de prospective « océan-atmosphère » a donc pour objectif

- d'identifier des axes de recherche qui pourraient se renforcer ou émerger à l'échelle des dix prochaines années ;
- d'identifier les forces et les faiblesses pour élaborer des recommandations sur les meilleures conditions à mettre en place pour permettre la réalisation des axes de recherche identifiés et leur valorisation ;
- d'implémenter la prospective transverse de l'INSU en tenant compte des spécificités des communautés OA.

Au-delà de l'identification de priorités scientifiques, l'exercice de prospective s'intéresse donc aussi aux moyens d'implémentation qu'ils soient instrumentaux, méthodologiques ou institutionnels ainsi que sur leurs adéquations aux défis scientifiques identifiés.

Du point de vue méthodologique, les approches basées sur la fusion des données, sur la confrontation modèles-observations, sur les liens simulations - études de terrains, sur l'intelligence artificielle, sur les données massives ou sur l'établissement de modèle haute résolution ou/et intégrant les processus émergents ont été largement discutées et sont aujourd'hui pleinement incluses dans les stratégies scientifiques, avec une attention particulière aux données issues du spatial.

Le concept de chantiers régionaux ou même thématiques a été réinterrogé à la lumière de nos priorités scientifiques et débouche sur l'identification de quatre aires prioritaires : les pôles, l'urbain, la zone intertropicale et le continuum continent-océan.

Du point de vue des moyens instrumentaux, la mise à disposition de moyens lourds partagés et l'émergence de nouvelles technologies, de capteurs miniaturisés, de nouveaux vecteurs mais aussi moyens de calculs haute performance ou d'algorithmes innovants ont été discuté et font l'objet de recommandation d'implémentation notamment en ce qui concerne le développement instrumental ou le phasage entre la nécessaire adaptation des architectures de calculs et la dynamique des communautés.

Les recherches menées dans le domaine océan-atmosphère appartiennent par nature aux sciences de l'environnement. Elles sont, par conséquent, d'un grand intérêt pour la société. Au-delà de la nécessaire construction d'un savoir académique, elles viennent aussi en réponse à une demande sociétale de plus en plus pressante, qu'elle soit formalisée par la commande publique (agence thématiques, collectivités...) ou plus diffuse par la réponse à une préoccupation croissante quant à l'état de notre environnement. Elles font donc aussi pleinement partie du corpus des sciences de la durabilité.

Cet état de fait confère aux questions d'éthique scientifique, de communication, de relations sciences-société dans le domaine OA, un caractère particulier dont la prospective s'est saisie d'une manière totalement inédite, s'interrogeant sur la place des initiatives privées dans l'implémentation de ses priorités, sur le concept d'opportunité ou de mécénat.

La prospective s'est aussi résolument emparée de la question de la sobriété énergétique de nos travaux et de notre indispensable cohérence dans ce domaine, traçant des lignes claires là où la communauté peinait à identifier sa trajectoire.

La direction de l'INSU tient à remercier chaleureusement toutes les personnes qui se sont impliquées de près ou de loin dans cet exercice indispensable pour notre communauté. Leur travail a produit une ressource d'une grande qualité dans lequel l'INSU et ses partenaires puiseront les grands axes de leur politique scientifique.

Nicolas Arnaud
Directeur de l'INSU

INTRODUCTION

Méthode prospective

La construction de cette prospective océan-atmosphère a été mandatée par l'Institut national des Sciences de l'Univers (INSU), en réponse à une lettre de mission du 8 décembre 2021 donnant à la commission spécialisée océan-atmosphère (CSOA dont la composition est détaillée en préambule), la responsabilité de l'animation et synthèse des grands enjeux du domaine. En réponse à cette demande, la CSOA a construit ses réflexions en impliquant la communauté par trois actions complémentaires en trois phases. Un bilan scientifique et des moyens sur l'exercice 2017-2022 a été synthétisé par les membres de la CSOA, consolidés par des consultations ponctuelles sur certaines

thématiques au sein de plusieurs groupes de travail, structuré suivant le texte de la prospective 2017-2022. Un second temps a été consacré à la consultation de la communauté par des échanges en visioconférence avec les vingt et un directeurs des unités mixtes de recherche du domaine OA, lors du printemps 2022. Chaque présentation a suivi un modèle de présentation qui a permis aux membres des différents groupes de travail de collationner les principales informations nécessaires. En parallèle, un forum permettait à toute personne (ou à des collectifs) de poster des contributions suivant des axes définis par la CSOA en réponse à la lettre de mission et aux principaux enjeux.

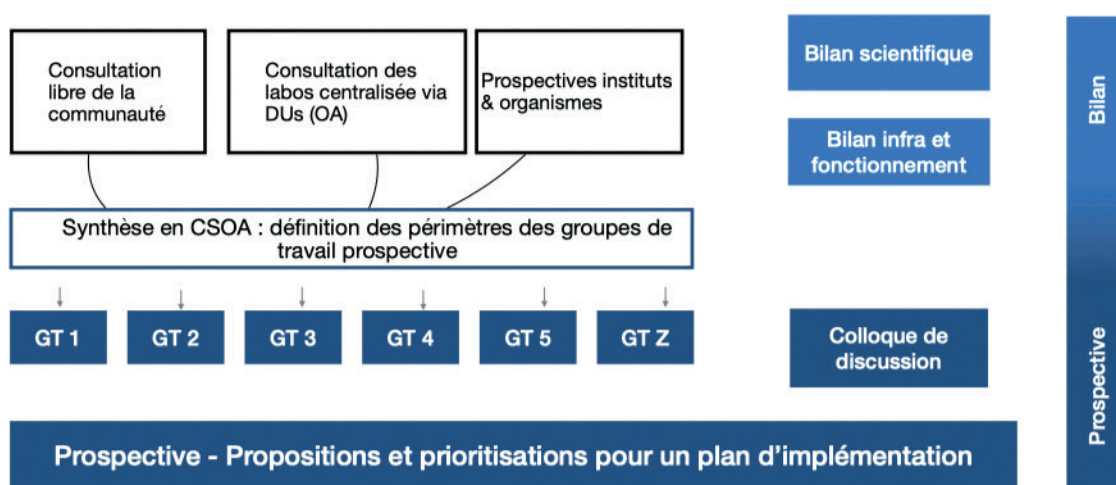


Figure 1 : Schéma synthétique de l'organisation de la prospective scientifique 2023 du domaine océan-atmosphère de l'INSU.

En juillet 2022 la CSOA, sur la base du bilan détaillé ci-dessous, des échanges avec les directions d'unité, des contributions sur le forum et des documents prospectifs des organismes (prospective transverse de l'INSU-CNRS, IRD, IFREMER, Météo-France et CNES) a défini une quinzaine de groupes de travail scientifiques pour l'animation de la communauté et la définition d'enjeux majeurs et de recommandations pour la prospective 2023. Ces groupes de travail ont été animés à l'automne-hiver 2022, et ont contribué par des textes synthétiques au document de travail, textes présentés et discutés lors du colloque de synthèse. Ce colloque a rassemblé 175 scientifiques du 10 au 13 janvier 2023 à Autrans. Sur la base de ces contributions, la CSOA a rédigé ce document prospectif, décliné en une version longue à

destination de la communauté et de nos organismes, une version courte sous forme de résumé exécutif à destination des organismes et agences de moyens, et des décideurs. La version longue du document a été discutée et adoptée lors de la CSOA du 30 mai 2023.

Ce travail de prospective a pu être mené grâce à l'implication de toute la communauté : les contributeurs du forum, les agents des unités de recherches, les directeurs d'unité avec lesquels la CSOA a échangé, les membres et responsables des services labellisés, les membres des CS des programmes nationaux, les chargés de mission de l'INSU et les membres de la CSOA, et avec le soutien de la direction de l'INSU.

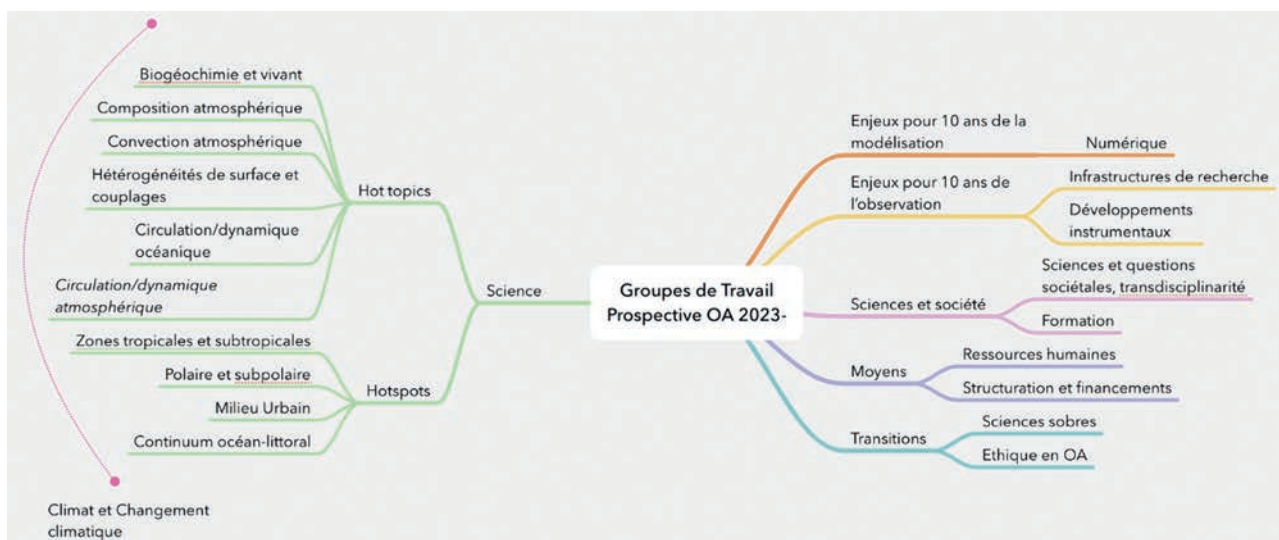


Figure 2: Liste des groupes de travail mis en œuvre à l'automne/hiver 2022 pour la prospective 2023 du domaine océan-atmosphère.

Bilan 2017-2022



Dislocation de nuages lenticulaires qu'un flux de sud avait formé par effet de foehn côté nord des Pyrénées, au Centre de recherches atmosphériques (CRA), dans les Hautes-Pyrénées. Ce phénomène se produit lorsqu'une masse d'air doit franchir un obstacle, comme ici les Pyrénées, et génère des oscillations de l'atmosphère s'accompagnant possiblement de zones de condensation, formant des nuages de type lenticulaire. Le CRA est situé près de Lannemezan, à 588 m d'altitude. Ce site ouvert de 70 ha permet d'observer des phénomènes atmosphériques tels que le foehn du fait de sa proximité avec la chaîne pyrénéenne, et de réaliser des mesures aéroportées au sens large (grâce à des drones, des hélicoptères, des ballons, etc.).

© Solène DERRIEN / LAERO / P2OA-CRA / CNRS Images

Les grands thèmes fondateurs du domaine océan-atmosphère

DES SYNERGIES CROISSANTES AU SEIN DE LA COMMUNAUTÉ OA

Le domaine océan-atmosphère partage avec les autres domaines scientifiques des Sciences De l'Univers et de l'Environnement (SDUE) de s'intéresser à des objets dont la taille et les échelles de temps nécessitent l'emploi d'outils lourds et la mobilisation de compétences diverses sur des temps longs. Pour le domaine OA, cela s'est traduit par un développement massif de ses moyens mutualisés (e.g. sites instrumentés, avions et navires de recherche, instruments et codes communautaires), de centres de données facilitant l'accès aux observations (e.g. spatiales, aéroportées, *in situ*, télédétections) et aux données numériques (e.g. modélisation climatique, simulation océanique... etc.) au sein d'Infrastructures de Recherches (IR), mais aussi par la forte structuration de sa communauté scientifique notamment au travers de Groupes de Recherches (GdRs). Ces caractéristiques, qui sont perçues comme autant de spécificités de nos communautés, ont souvent eu un rôle de levier dans la participation de la communauté française à de grands projets nationaux ou des consortia internationaux. Ils ont permis de développer de fructueuses synergies entre disciplines, entre observation et modélisation, entre études de processus et études climatiques, entre échelles de temps, entre climats passés, présent et futurs...

Dans le domaine de l'observation, trois tendances ont particulièrement favorisé ces synergies :

- Les développements instrumentaux récents ont permis une amélioration significative de l'observation de la Terre à des résolutions toujours plus fines (spatiales et temporelles), ce qui permet désormais de détecter et d'analyser sur de très grands domaines (jusqu'au global) des phénomènes, des constituants ou des objets (constituants chimiques, poches froides d'origine convective, etc.) qui n'étaient, jusque là, observables que sur un domaine limité *via* des sites instrumentés ou des campagnes de terrain ou en mer. La spatialisation de nos données *in situ* que projetaient les perspectives précédentes permet aujourd'hui de mettre en contexte et de tester la généralité des observations et des connaissances obtenues à l'échelle locale ou régionale, et d'étudier des processus de petite échelle pour les projeter à des échelles plus larges allant jusqu'au global.
- La complémentarité des approches expérimentales, combinant mesures *in situ*, télédétection passive et active (au sol ou aéroportée), mesures spatiales issues d'un ensemble de satellites (volant éventuellement en constellations) mesurant chacun des variables géophysiques différentes est un atout pour l'étude de processus et la compréhension de phénomènes complexes.

- L'organisation de campagnes de terrain/campagnes multi-échelles, multi-plateformes, multi-disciplinaires et multi-instruments permet de mieux comprendre l'articulation entre processus de petite échelle, processus de méso-échelle et phénomènes de grande échelle ou d'échelle climatique.

Ces tendances sont renforcées par la recommandation croissante à publier les données scientifiques selon les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) sur des sites ouverts. Elles donnent une crédibilité renforcée à la perspective proche d'une interopérabilité généralisée de nos données.

Dans le domaine de la modélisation, quatre tendances ont également favorisé ces synergies :

- L'utilisation croissante d'une hiérarchie de modèles pour la compréhension des processus (et notamment des interactions d'échelles) et le développement de paramétrisations physiques: simulations de type Large Eddy Simulations (LES) où l'essentiel des mouvements sont explicitement résolus, des simulations Convection Permitting où seule la convection profonde est explicitement résolue, et des simulations où tous les processus convectifs sont paramétrés.
- Le développement de nouvelles méthodes d'ajustement des paramètres libres à partir d'outils statistiques avancés permettant de quantifier l'incertitude paramétrique des modèles, de formaliser le processus de calibration et de déterminer de façon objective et au plus près des processus, les valeurs optimales des paramètres. Ces méthodes visent également à mieux estimer l'incertitude structurelle des modèles.
- L'amélioration du contenu physique des modèles de prévision du temps, de l'océan et de climat via le développement de paramétrisations physiques, qui jouent un rôle-clé à toutes les échelles et résument notre compréhension des processus atmosphériques avec une tendance vers des paramétrisations stochastiques et scale-aware.
- La réalisation, la distribution et l'analyse de grands ensembles de simulations nourrissent de très nombreuses études sur des thématiques allant de l'étude du fonctionnement physique du système climatique aux grands cycles biogéochimiques. Elles permettent aussi une meilleure compréhension de l'articulation entre climats passés, actuels et futurs et une meilleure appréciation du rôle relatif de la variabilité naturelle et des perturbations naturelles ou anthropiques. On le doit notamment à la participation aux projets internationaux de comparaison des simulations climatiques, avec notamment, le fort investissement de la communauté française dans les projets CMIP6, PMIP4 et CORDEX.

Dans le domaine de l'expérimentation, la période récente a vu se développer encore les expériences sous conditions contrôlées mais cherchant à atteindre un maximum de réalisme dans les conditions opératoires.

Dans le domaine de la biogéochimie marine, les mésocosmes encore largement employés au début de la période précédente ont été complétés par des expériences en minicosmes embarquables sur les navires de la Flotte Océanographique Française pour être alimentés en eaux prélevées au large. Destinés à l'étude des effets du changement global sur les communautés biologiques, en particulier les microorganismes, les minicosmes ont mis en évidence les effets fertilisants des poussières désertiques (campagne PeaceTime) et les effets fertilisants et/ou toxiques des fluides hydrothermaux que ce soit à la surface des océans ou dans les grands fonds (campagnes Tonga, Bicosé 2).

En chimie atmosphérique, l'emploi des chambres de simulation a vu son domaine d'application largement étendu grâce au programme d'Infrastructure EUROCHAMP-2020. Les chambres de simulation atmosphérique initialement essentiellement employées à l'étude des mécanismes de la pollution photochimique sont maintenant utilisées pour l'étude de mécanismes et de propriétés d'intérêt climatique (propriétés optiques des aérosols), pour l'étude des effets sur la santé ou les œuvres d'art de la pollution, pour l'étude des processus aux interfaces air/eaux ou pour l'étude des transformations chimiques des émissions (automobiles, feux...).

Processus et phénomènes atmosphériques

Aux petites échelles, des progrès importants ont été faits dans la compréhension des couches limites stables aux moyennes latitudes et dans les régions polaires. Par exemple, la compréhension des écoulements sur relief marqué et leur impact sur le transport de polluant a été documenté grâce à des observations et des simulations à échelle hectométrique. Les processus impliqués dans la transition entre les différentes phases de brouillards radiatifs ont été compris grâce à une synergie entre mesures télédétections et *in situ*. Par exemple, les couches limites extrêmement stables observées à Dôme C (Antarctique) indiquent des régimes de stratification contrôlés par le vent. Ces dernières ont pu être simulées à différentes résolutions dans le cadre d'une intercomparaison internationale. Suite à des développements dans les paramétrisations de turbulence, ces couches limites sont désormais mieux représentées.

Les processus à l'œuvre au sein des nuages convectifs et leur couplage avec les processus de couche limite sous-jacents ont été décrits plus en détails grâce à des simulations à très fine résolution (échelle métrique) et des observations aéroportées par avions ou par drones. Les échanges entre les nuages et l'environnement sont désormais mieux pris en

compte dans les paramétrisations permettant notamment une reproduction réaliste de la transition stratocumulus-cumulus.

La combinaison de différents jeux d'observations, notamment spatiaux, et de modélisation réaliste ou en configuration plus idéalisée a permis d'obtenir une meilleure compréhension du cycle de vie des systèmes convectifs profonds, de leur organisation spatiale et de leur interaction avec les aérosols.

Un regain d'intérêt pour le transfert radiatif est à noter dans la communauté française : sa simulation, et son inversion afin d'interpréter les observations de télédétection des différentes missions spatiales, a progressé de l'UV à l'infrarouge lointain, à moyenne ou haute résolution spectrale. Sa prise en compte à plus fine échelle a également progressé permettant de mieux représenter les effets radiatifs 3D des nuages, de la canopée ou des bâtiments.

La caractérisation optique, physique et chimique des aérosols de différentes natures (panaches volcaniques, poussières désertiques, carbone suie, carbone organique, aérosols organiques secondaires) a été améliorée grâce à leur suivi observationnel. Ce suivi a été réalisé via des campagnes de mesures ou sur le long terme par des observatoires associés à des méthodes d'analyse innovantes, ou l'étude de leurs propriétés intrinsèques dans des chambres de simulation atmosphérique. Ces avancées technologiques ou d'analyses permettent aussi de mieux décrire leur forçage radiatif, leurs émissions, leurs processus de formation ou de destruction et leurs dépôts. La représentation des aérosols dans les modèles, et notamment de leurs propriétés d'absorption du rayonnement à différentes longueurs d'onde, a également progressé.

Grâce à l'observation spatiale combinant lidar et radar, aux campagnes de mesures aéroportées dédiées, et à la modélisation microphysique détaillée, des progrès ont été obtenus dans la caractérisation des propriétés microphysiques de la glace des systèmes convectifs à méso-échelle et dans la compréhension des mécanismes de formation des cristaux de glace. Notamment, il a été montré que la grande abondance des petits cristaux ne peut s'expliquer seulement par les processus de nucléation primaire de la glace ; elle nécessite de prendre en compte les mécanismes de production secondaire tels que l'éclatement lors du givrage ou la fragmentation par collisions. De plus, les processus contrôlant la température de glaciation sont mieux compris, avec notamment la mise en évidence du rôle relatif de la microphysique (taille des gouttes), des conditions thermodynamiques et des aérosols.

Des études combinant mesures de terrain et modélisation ont mieux documenté les processus contrôlant le potentiel oxydant des aérosols, qui importe en particulier pour l'impact sanitaire de la pollution atmosphérique. Elles ont mon-

tré l'importance des sources anthropiques de ces aérosols en milieu urbain, et l'influence de la complexation du fer sur la capacité oxydante de l'atmosphère.

Enfin, il a été montré que les échanges entre la surface de l'océan, l'activité biologique et l'atmosphère influencent la composition chimique et microphysique de l'eau nuageuse, que l'abondance du nanophytoplancton module les émissions de composés organiques volatiles, et que les précurseurs gazeux et les processus aqueux influencent la formation des aérosols. Le rôle des hétérogénéités de surface dans la dynamique atmosphérique a fait l'objet d'une attention particulière.

A grande échelle, la surveillance des gaz à effet de serre, des polluants et des aérosols a progressé significativement ces dernières années grâce, notamment, au développement de mesures et de méthodes permettant de cartographier les sources de polluants, de surveiller les émissions urbaines des gaz à effet de serre, NO_x et CO, et de reconstruire en quasi temps réel les émissions de CO₂ à l'échelle globale. Ces progrès ont été accompagnés et consolidés par l'installation en France d'un centre Européen de traitement et de contrôle qualité des mesures de gaz à effet de serre (ICOS ATC).

Le développement de méthodologies innovantes permet de déterminer, à partir d'observations spatiales, la distribution, la composition et les propriétés optiques des aérosols présents dans l'atmosphère à l'échelle globale, et notamment de mieux caractériser la distribution tridimensionnelle des poussières désertiques, des aérosols sulfatés et des aérosols émis par les feux. Enfin, un traitement automatisé des observations depuis le sol et depuis l'espace, et des mesures *in situ* de la qualité de l'air permet d'identifier l'évolution temporelle et tridimensionnelle des panaches volcaniques et des aérosols associés.

Outre les gaz à effet de serre et les aérosols, la composition chimique de l'atmosphère est de mieux en mieux documentée. L'assimilation dans un modèle de chimie-transport de radiances mesurées par différents satellites permet pour la première fois de produire de longues réanalyses de la teneur en ozone troposphérique. Les tendances à long terme du profil d'ozone stratosphérique sont mieux évaluées, et les interactions chimie/climat sont mieux représentées dans les modèles de circulation générale. On note également deux thèmes émergents: d'une part, la caractérisation des microplastiques dans l'atmosphère, et d'autre part l'étude de l'ammoniac atmosphérique (cf. bilan sur les interfaces).

Des progrès ont été réalisés dans la compréhension des processus physiques qui contrôlent la composition et la dynamique de la haute troposphère et de la stratosphère. Des simulations atmosphériques à très fine échelle et de nouvelles observations lidar ont permis de mieux comprendre

les mécanismes d'hydratation de la stratosphère par la convection profonde. Des observations ballons de longue durée ont permis de documenter le spectre complet des ondes atmosphériques au voisinage de la tropopause tropicale, permettant ainsi de valider les nouvelles observations spatiales du vent et d'évaluer les simulations numériques (campagne STRATEOLE2). Enfin, les tendances des nuages stratosphériques polaires ont pu être reliées aux tendances de température locale en Antarctique, la variabilité et l'évolution de la stabilité des vortex polaires sont mieux comprises et des études ont mis en évidence l'impact des feux intenses sur le vortex et la composition de la stratosphère.

Les interactions d'échelles ont fait l'objet d'une attention particulière, avec notamment l'émergence au cours des dernières années de la thématique portant sur l'impact de l'organisation spatiale de la convection atmosphérique sur le climat. Plusieurs études observationnelles d'une part, et de modélisation dans des cadres idéalisés et réalistes d'autre part, ont montré que l'organisation à mésoéchelle de la convection profonde, notamment la propension des nuages convectifs à s'agréger en amas, affectait l'humidité moyenne et la nébulosité des Tropiques, avec un impact très significatif sur le bilan radiatif de la Terre et l'intensité des événements extrêmes de pluie. Ces résultats soulignent l'importance de mieux comprendre les facteurs responsables de l'organisation de la convection et de ses variations.

L'amplification du réchauffement global par les rétroactions nuageuses reste l'une des principales sources d'incertitudes pour les projections climatiques. Toutefois, l'analyse des observations de campagnes aéroportées, de sites instrumentés et de satellites a permis d'avancer dans la compréhension physique et l'évaluation des processus de rétroaction à l'œuvre dans les modèles climatiques. Les mécanismes qui contrôlent l'humidité et la couverture nuageuse des petits cumulus dans les régimes d'alizés sont désormais mieux compris: notamment le rôle des circulations atmosphériques de méso-échelle a été mis en évidence, et le mécanisme qui dans certains modèles climatiques est à l'origine d'une forte amplification du réchauffement global par les cumulus d'alizés a été invalidé par les observations (campagne EUREC4A). D'autre part, les mécanismes thermodynamiques et radiatifs qui contrôlent la réponse des nuages d'enclume tropicaux à des perturbations d'origine anthropique ou naturelle sont mieux compris, mais l'impact de cette réponse sur le bilan radiatif reste incertain.

L'influence des processus humides sur la dynamique de grande échelle a été également mieux documentée; la campagne NAWDEX a par exemple mis en évidence l'importance de la convection dans la structure du courant jet d'altitude. D'autre part, des progrès ont eu lieu dans la compréhension des interactions entre ondes équatoriales et convection profonde, et l'importance des croisements d'ondes pour les événements extrêmes de précipitations.



Processus et phénomènes océaniques

Aux petites et méso-échelles, la diversité des situations et régimes régionaux, voire locaux, a donné lieu à de nombreuses études spécifiques, comme par exemple la prédominance du rôle de la petite méso-échelle aux hautes latitudes et en milieu côtier, les interactions non-linéaires des courants profonds avec la topographie, la cascade d'énergie vers les fines échelles ou l'influence des fronts sous-méso-échelle jusqu'à des profondeurs de plusieurs centaines de mètres dans l'Austral. Cette dynamique physique à fine

échelle impacte également la structuration de la biogéochimie et des écosystèmes marins dans plusieurs régions (ex. processus d'agrégation d'algues sargasses en Atlantique Nord Tropical).

Aux hautes latitudes, le développement des produits spatiaux plus fins dans les zones de glace en Arctique et Antarctique, combiné avec les observations *in situ* (incluant SNO COOL, SNO SSS, et les animaux instrumentés (bio-logging) du SNO MEMO) et la modélisation à haute résolution, ont permis de nombreuses avancées, notamment l'identifica-



Ces petits nuages de basse altitude sont des cumulus d'alizés, ici organisés en arcs de cercle. Ils offrent peu de couverture nuageuse et constituent la majorité peu connue des nuages au-dessus de l'océan tropical.

© Sandrine Bony, LMD

tion des fronts, tourbillons et courants de pente présents, et leur rôle pour le mélange de traceurs biogéochimiques et dans la distribution et déstabilisation de la glace de mer.

La communauté française garde un leadership sur la modélisation et l'observation de processus océaniques à haute fréquence : la marée, les ondes d'inertie-gravité, des vagues/houle. La préparation de la mission altimétrique à haute résolution SWOT (lancée fin 2022) a stimulé de nombreuses études de modélisation dédiées à la séparation du mode vertical (tourbillons méso-échelle) et d'ondes d'inertie-gra-

vitité (ex., ondes internes de marée). La compréhension des interactions entre ces deux modes s'en est trouvée considérablement renforcée, de même que celle de la dissipation de la marée interne. Dans certaines zones, cette dernière se révèle avoir un effet important sur les courants profonds et les masses d'eau en surface et en profondeur. Dans le cas extrême de la région indonésienne, c'est le climat dans tout l'Indo-Pacifique qui est affecté par cet effet d'upscaling.

Dans les couches de surface, l'étude à fine échelle des relations entre vent et la rugosité de surface, les vagues, et les

courants à fine échelle ouvre de nouvelles perspectives en termes de représentation des interactions air-mer et de leurs effets lors des événements extrêmes; et contribue à la préparation de missions spatiales dédiées (CFOSAT, OdySea ...).

À grande échelle, les bilans de chaleur et d'eau douce ont été l'objet de nombreux travaux, motivés par leur importance pour le changement climatique global et régional. Des études ont révélé dans les régions polaires et subpolaires les processus à l'origine de leur variabilité à l'échelle décennale. Elles ont aussi mis en exergue l'importance croissante de l'océan profond pour équilibrer les bilans à l'échelle planétaire. L'infrastructure de recherche océanique Argo, les campagnes *in situ* et les observations satellitaires sont d'une importance cruciale pour nos avancées dans ce domaine. L'utilisation des isotopes de l'eau a également permis des avancées considérables dans l'attribution des apports d'eau douce à grande échelle, avec par exemple la sous-estimation du rôle des précipitations dans l'Océan Austral. Aux latitudes tempérées, la variabilité du contenu de chaleur de l'océan est fortement conditionnée par la variabilité chaotique intrinsèque de l'océan, rendant difficile sa prédictibilité à moyen et long terme par les modèles dits « eddy-permitting » ainsi que son attribution par des réseaux d'observation.

La variabilité de la circulation méridienne de retournement (MOC) est l'objet d'une grande attention car les modèles de climat suggèrent que cette circulation ralentira sous l'effet des activités humaines, avec de nombreuses conséquences. Une meilleure compréhension des mécanismes qui sont à l'origine de cette variabilité a permis de mieux distinguer les composantes naturelles et anthropogéniques de ses variations. En termes d'observations, le réseau international OS-NAP dans le gyre subpolaire Atlantique, initié en 2014, est venu compléter le réseau RAPID (2004>) et les campagnes biennales OVIDE (2002>). Des observations régionales ont permis de caractériser et de quantifier les échanges dans les régions clés de la MOC (Ride de Reykjanes, Terre-Neuve, anneaux d'Agulhas), en particulier sur la circulation des eaux intermédiaires et profondes. La prédictibilité de la MOC reste un sujet largement débattu, et les derniers résultats des modèles de climat montrent une très grande dispersion de tendances dans les prochaines décennies.

La densification des données de traceurs géochimiques par des actions coordonnées, telles que le programme GEOTRACES, a ouvert de nouvelles perspectives d'applications. Par exemple, la distribution de traceurs est utilisée pour décrire la circulation océanique, et la modélisation explicite de ces traceurs dans les modèles numériques a permis de mieux comprendre les processus physiques et biogéochimiques qui contrôlent leur distribution et leur régulation, ce qui en fait un outil d'évaluation unique pour les modèles. Comme certains traceurs géochimiques peuvent être enregistrés dans les archives sédimentaires, une meilleure compréhension du comportement de ces derniers

contribue à la reconstitution plus fiable de la circulation océanique dans le passé.

Les interactions d'échelles figuraient dans les dernières perspectives OA comme un élément déterminant pour l'amélioration de notre capacité à modéliser et observer la dynamique océanique à méso- et à sous-méso-échelle. La combinaison d'observations satellites multicapteurs et *in situ* (ex. Argo, bio-logging...), de simulations numériques, et l'assimilation de ces données dans les modèles, a permis d'affiner l'étude de la dynamique de méso-échelle, de son rôle dans les transports de propriétés et ses interactions avec d'autres échelles.

Le développement des modèles océaniques à très haute résolution (1/36° - 1/60°) a permis d'étudier les interactions d'échelle du bassin aux échelles de la dissipation, et de quantifier comment la cascade inverse d'énergie (des petites vers les grandes échelles) et la cascade directe varient régionalement et saisonnièrement.

La méso-échelle océanique impacte fortement la dynamique atmosphérique: elle joue un rôle dans le pré-conditionnement des événements extrêmes (ex. intensité des cyclones, événements Cévennols) et des simulations couplées montrent que la cascade inverse d'énergie océanique devient plus faible à cause des interactions couplées entre les courants océaniques et le vent (effet d'« Eddy Killing »). Les observations satellites ont permis de calibrer des modèles globaux, qui à leur tour ont permis de montrer que la prise en compte de la méso-échelle donnait un caractère chaotique à la variabilité interannuelle à décennale à grande échelle. Les implications de ce résultat sont nombreuses pour l'interprétation et l'attribution des signaux observés, ainsi que pour la prévisibilité/prévision océanique.

Variabilité, tendances climatiques, changement climatique et paléoclimats

L'analyse de la variabilité climatique est essentielle si l'on veut mieux appréhender le changement climatique. Des méthodes de détection/attribution du changement climatique permettent d'attribuer le réchauffement global sans ambiguïté à l'activité humaine, en distinguant pour certaines variables, les contributions des gaz à effet de serre des autres facteurs anthropiques (notamment les aérosols). Le développement de méthodes statistiques a permis de mieux décrire et quantifier le lien entre un événement extrême observé et le réchauffement climatique d'origine anthropique, à la fois en termes de fréquence et d'intensité. Un travail significatif a permis d'obtenir des « contraintes observationnelles » sur le changement climatique, à savoir d'extraire des informations utiles des observations permettant de préciser le changement climatique passé. Ces méthodes permettent aussi d'apporter une contrainte sur les prévisions du changement climatique futur en combinant observation et modélisation. Différentes méthodes

(dynamique, statistique ou par apprentissage machine) de descente d'échelle permettent de proposer des scénarios régionaux du changement climatique à une résolution de quelques kilomètres.

L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère entraîne transitoirement un déséquilibre du bilan radiatif terrestre et un gain d'énergie du système Terre. Celui-ci s'accumulant principalement dans l'océan, le déséquilibre du bilan radiatif global est estimé à partir des mesures du contenu de chaleur global de l'océan. La comparaison des estimations faites à partir de mesures *in situ*, de mesures spatiales et de réanalyses océaniques montre que les estimations progressent et s'affinent, mais qu'elles sont encore entachées d'incertitudes significatives. Par ailleurs, il a été montré que l'évolution observée du bilan radiatif global au cours des dernières décennies ne pouvait pas aider à contraindre la borne supérieure des estimations de la sensibilité climatique, mais qu'elle pouvait aider à contraindre la borne inférieure.

Les causes et les impacts de l'amplification polaire du réchauffement global ont été étudiés. La fonte de la banquise Arctique entraîne un fort réchauffement au pôle, mais aussi (dans une moindre mesure) aux moyennes latitudes. La méthode des analogues atmosphériques a permis d'interpréter ces résultats et de quantifier l'impact des changements de circulation atmosphérique dans ces réponses.

L'étude des événements extrêmes de différentes natures (précipitations, crues, feux intenses, vagues de chaleur atmosphérique ou océanique) a permis de mieux les documenter, comprendre les processus en jeu et améliorer leurs méthodes de prévision. Par exemple, une baisse des cyclones est plutôt envisagée dans le futur mais avec des cyclones plus intenses et possiblement décalés un peu vers les pôles et plus tard dans la saison. Aussi, plusieurs études montrent qu'un couplage 3D avec l'océan est important pour mieux représenter les changements d'intensité des dépressions tropicales; cependant la représentation des flux à l'interface océan-atmosphère reste plus importante. L'influence de l'organisation à méso-échelle de la convection sur l'intensité des événements extrêmes de précipitation amène à revoir l'estimation purement thermodynamique des changements de pluies extrêmes avec la température. Enfin, les vagues de chaleur des régions tropicales qui se produisent en période humide reçoivent une attention croissante du fait de leur impact particulièrement sévère sur la santé.

À l'échelle décennale, la réponse du climat aux perturbations anthropiques peut être fortement modulée par les fluctuations intrinsèques du système climatique aux échelles de temps interannuelle à décennale. Des progrès ont été faits dans la quantification du rôle relatif des forçages anthropiques et de la variabilité interne du climat dans les variations décennales du climat. L'impact des modes de variabilité naturelle du climat (par exemple les

modes de variabilité décennale de l'océan Atlantique ou Pacifique) sur la réponse régionale des pluies tropicales aux forçages anthropiques a été mis en évidence et expliqué par un mécanisme radiatif. Enfin, il a été montré que les modes de variabilité interne (El-Niño, circulation atmosphérique, AMOC) pouvaient réagir à des forçages externes tels que des éruptions volcaniques.

Plusieurs mécanismes possibles de déstabilisation des plateformes de glace ont été identifiés pour les marges de l'Antarctique, pouvant amener à de fortes augmentations du niveau de la mer. Le rôle des rivières atmosphériques a été démontré. Au cours des vingt dernières années, elles ont produit des extrêmes de température, entraînant d'importants taux de fonte, déstabilisant la banquise et créant des houles fortes. Le mécanisme associé à l'instabilité des falaises de glaces marines semble par contre moins probable alors que des incertitudes fortes restent associées à la part du frottement basal.

Des premières cartes globales de pertes de masses de plus de 200 000 glaciers au cours des deux dernières décennies ont été établies à partir d'analyse photogrammétrique d'images satellites. Elles indiquent une forte accélération des pertes de masse, en réponse au premier ordre à la hausse de la température, modulée régionalement par la variabilité décennale des précipitations.

L'étude des paléoclimats permet d'illustrer l'amplitude et la vitesse de l'évolution naturelle du système climatique et ses impacts sur l'environnement. Ces éléments constituent des tests de notre compréhension du système climatique et de sa sensibilité à des forçages tels que l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre. Des reconstructions de ce climat ont par exemple été utilisées pour mieux contraindre les estimations de la sensibilité climatique, mettant à profit l'exercice PMIP (Paleoclimate Modelling Intercomparison Project) coordonné par la France depuis 30 ans.

Ces dernières années ont vu progresser une description intégrée, multi-composantes, des variations du système climatique, notamment grâce à la construction de compilations de données sur des échelles d'âge communes et leur utilisation pour des reconstructions de paramètres grande échelle, voire globaux (e.g. vents d'ouest, productivité globale de la biosphère). Les premières simulations françaises de la dernière déglaciation à l'aide d'un modèle climatique incluant les calottes glaciaires ont montré l'importance des lacs proglaciaires dans la déstabilisation des calottes de glace. Ces résultats augurent d'études passionnantes conjuguant modèles et reconstructions, notamment sur la vitesse des changements climatiques abrupts et le rôle des différentes composantes du système climatique dans ces changements.

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

LES INTERFACES OCÉAN/ATMOSPHÈRE/CRYOSPHÈRE

Une activité riche sur le couplage **atmosphère-océan** s'est développée depuis la précédente prospective. Il a notamment été montré que le couplage océan-atmosphère à fine échelle a un rôle dans la détermination de la dynamique océanique et modifie la conception habituelle des courants induits par le vent. Le vent n'est pas seulement une source d'énergie à grande échelle qui initie une cascade de turbulences ; il interagit également à une fine-échelle et affecte directement tout le spectre océanique des marées jusqu'au courants grande-échelle. La dynamique frontale océanique est également fortement impactée par les interactions entre l'océan et l'atmosphère. Ces dernières induisent une diminution de l'intensité des fronts et des tourbillons à fine-échelle. Le couplage océan-atmosphère, en réduisant l'activité mésoéchelle, induit une stabilisation des courants de bord-ouest, notamment le Gulf Stream et le courant des Aiguilles. Cette stabilisation a alors un impact sur l'atmosphère et notamment sur les précipitations.

Les méthodes numériques ont également largement progressé. Les algorithmes de couplage ont été évalués et montrent des défauts de synchronisation entre océan et atmosphère impactant dans les modèles couplés le phasage du cycle diurne et des statistiques plus long terme. Une méthode itérative de Schwartz permettant un couplage plus cohérent (mais numériquement très coûteuse) a été mise en place pour fournir une solution de référence et ainsi permettre de faire évoluer les approches algorithmiques usuelles. Des approches de descentes d'échelles dites « low-fidelity physically based » ont été développées, l'objectif étant d'obtenir une complexité intermédiaire entre un forçage « bulk » et un couplage avec un modèle atmosphérique 3D tout en ayant un coût de calcul proche de celui du modèle océanique seul. Un modèle Large-Eddy-Simulation (LES) couplé océan-atmosphère a également été développé dans le code unique communautaire Méso-NH (i.e. sans coupleur externe) avec pour l'atmosphère et l'océan les mêmes schémas numériques et paramétrisations, ouvrant la perspective de simuler explicitement les rétroactions entre couches limites atmosphérique et océanique pour la première fois aux échelles des tourbillons turbulents (1 à 100 m de résolution horizontale).

Notre connaissance des flux de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère et de la distribution spatio-temporelle des puits et des sources océaniques de CO₂ pour l'atmosphère s'est considérablement améliorée grâce aux progrès de la modélisation des échanges physiques air-mer et de leur impact sur les cycles biogéochimiques en surface. Nous avons éga-

lement établi une meilleure estimation de ces flux grâce à l'amélioration des observations et des algorithmes satellitaires, et à un réseau varié de mesures *in situ* du CO₂ : *via* des sites dédiés (SNO SOMLIT, CororICO₂, MOOSE, PIRATA...), au cours de campagnes sur des navires de recherche (OISO, Eurec4A) ou sur des navires d'opportunité (SurAtlant, Minerve, Tara...), et à partir de bouées dérivantes (ex., CARIOCA, BGC-Argo). Un effort important a été fait pour améliorer la qualité de ces observations *in situ*, à travers le maintien de service d'analyse de référence (par exemple SNAPO-CO₂) mais également de laboratoires de métrologie dédiés à étalonnage des capteurs (DT-INSU et IFREMER pour l'océan, et au LSCE pour les mesures atmosphériques). L'ensemble est coordonné par ICOS France (Integrated Carbon Observing System), spécifiquement dédié à la mesure des flux et des concentrations de CO₂, de méthane et d'oxyde nitreux.

Si la formation d'aérosols marins par les embruns marins est connue et paramétrisée en fonction de grandeurs physiques, la contribution de la biologie de l'interface océan-atmosphère à la production de noyaux de condensation nuageuse par émission directe ou par formation d'aérosol organique secondaire, a fait l'objet d'avancées significatives. En particulier, une relation claire entre l'abondance du nanophytoplancton dans l'eau de mer et les noyaux de condensation des nuages (CCN) dérivés des embruns marins a été établie. Dans le même temps a été détecté l'émission par le biote marin de concentrations massives de composés organiques volatils (COV) précurseurs d'aérosol organique, aussi bien dans la partie côtière de l'écosystème de Benguela qu'à partir d'eau de mer échantillonnée dans le Pacifique Sud.

Ces avancées ont pour partie bénéficié de l'initiative multidisciplinaire internationale SOLAS (Surface Ocean - Lower Atmosphere Study) qui vise à assurer la coordination scientifique internationale et le renforcement des capacités sur la thématique. Elles se sont appuyées sur plusieurs campagnes à la mer qui ont renforcé la synergie entre chercheurs et laboratoires des deux communautés dans les océans Pacifique, Atlantique et en Méditerranée (PEACE-TIME - 2017, TONGA - 2019, Sea2Cloud - 2020, AEROCLO-sA).

La prospective 2012-2017 insistait sur les spécificités des régions polaires, nos besoins de mieux comprendre les processus aux interfaces **océan-atmosphère-cryosphère**, et de mieux contraindre les projections d'évolution de la cryosphère marine et continentale et leurs impacts sur le climat global.

Des progrès ont été faits dans la compréhension des processus thermo-halins et optiques dans la glace de mer et leur

représentation dans les modèles du climat. L'activité biologique et chimique dans la banquise a été précisée et semble peu à même d'affecter les cycles biogéochimiques marins à l'échelle globale, en particulier celui du carbone. L'évolution future de l'étendue de la banquise Arctique est également maintenant mieux contrainte et augure un Arctique régulièrement libre de glace l'été à l'horizon 2050.

La communauté nationale s'implique dans le suivi durable des bilans de chaleur et de carbone dans l'océan Austral et leur variabilité interannuelle (ex. OISO et projet SURVOSTRAL), et la quantification de leurs flux à l'interface air-glace. Cet effort est complété par la modélisation: la circulation océanique dans les cavités sous les plateformes de glace est maintenant implémentée dans le modèle d'océan NEMO et nos capacités d'estimation des flux de fonte de la plateforme ont été substantiellement améliorées, ce qui permet un meilleur couplage avec les modèles d'écoulement de calottes polaires (e.g. code communautaire Elmer/Ice). Enfin la communauté française est un pivot à l'échelle internationale sur l'évaluation des modèles de climat et la régionalisation des projections climatiques sur les calottes polaires, et sur l'évaluation du bilan de masse de surface, conditions aux limites essentielles avant la modélisation de l'évolution des calottes polaires et son impact sur le niveau des mers.

L'INTERFACE AVEC LA ZONE CRITIQUE (ZC)

La Zone Critique désigne la zone superficielle qui se situe à l'interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Elle comprend un grand nombre de composants souvent étudiés par des disciplines différentes mais tous interconnectés (roches altérées, eaux profondes, eaux de surface, sols, écosystèmes aériens et microbiote souterrain, basse atmosphère) car liés par des transformations aux échelles de temps différentes et emboîtées. La zone critique est le fruit d'une longue évolution et une zone clé dans le maintien de l'habitabilité de la Terre. Critique, cette zone l'est aussi à l'heure de l'Anthropocène.

Morpho-dynamique littorale et trait de côte

La modification du trait de côte par les événements extrêmes de submersion marine et d'érosion est mieux comprise. La modélisation numérique a permis notamment de discriminer les contributions relatives, de la surcote atmosphérique, des vagues et des ondes infragravitaires. Aux plus grandes échelles spatiales et temporelles, l'effet de la variabilité climatique et des interventions humaines sur le transport et le transfert sédimentaire à l'interface terre-océan a pu être quantifié. Sur les littoraux sableux, le développe-

ment d'une nouvelle génération de modèles d'évolution du trait de côte basée sur des approches hybrides ont permis des avancées majeures. En particulier, les simulations d'ensemble incluant l'augmentation du niveau moyen de mer permettent, sur certains littoraux, les premières projections du trait de côte à l'horizon 2100 et des incertitudes associées. L'influence des modes de variabilité naturelle du climat dans l'Atlantique Nord sur les vagues de tempêtes, les érosions extrêmes et les variabilités interannuelles du trait de côte et des débits des fleuves le long du littoral Atlantique européen ont aussi été élucidés. L'évolution des littoraux n'est toutefois pas uniquement contrôlée par des facteurs externes; elle l'est aussi par des facteurs internes. Par exemple l'évolution pluriannuelle à pluri-décennale des côtes à mangrove est largement affectée par l'accolement de bancs de vase, les littoraux adjacents aux embouchures où la dynamique interne des chenaux reste difficile à modéliser et à prédire, ou encore les flèches littorales. Pour les côtes à falaises, les contributions relatives des processus d'érosion d'origines internes et externes sont désormais mieux connues et quantifiées, notamment grâce aux couplages de données de télédétection très haute résolution et par des mesures *in situ*. Ces nouveaux résultats confirment et quantifient le rôle prépondérant des facteurs météo-marins sur les processus d'érosion. Plus globalement, les travaux menés par la communauté nationale montrent à la fois la richesse et la complexité des évolutions et des processus moteurs mis en jeu, soulignant le besoin de croiser la modélisation numérique et théorique avec les mesures fines des processus, l'observation récurrente et l'exploitation des données satellitaires.

Hydrodynamique littorale, biogéochimie et interactions avec les peuplements biologiques

Des progrès importants ont été réalisés dans la compréhension et la modélisation des processus hydro-sédimentaires fondamentaux contrôlant l'évolution des littoraux (barrières sédimentaires, côtes à falaise, à mangrove, estuaires et lagunes, récifs frangeants). En particulier dans les environnements dominés par l'action des vagues, l'amélioration des paramétrisations de la dissipation d'énergie des vagues et la description 3D des circulations induites permet désormais de mieux connecter le domaine littoral et le domaine côtier. Des développements théoriques permettent maintenant de reconstruire l'élévation de la surface libre à partir de la pression mesurée *in situ*, ce qui va permettre d'avancer dans la compréhension des mécanismes physiques contrôlant la transformation non-linéaire des vagues. Concernant la dynamique de la marée en domaine estuarien, la combinaison de l'imagerie satellitaire et de la modélisation numérique a permis, entre autres, d'établir une première

classification des estuaires tidaux en termes d'occurrence des ressauts de marée, d'identifier le double rôle du débit fluvial pour générer et dissiper des subharmoniques de marée et de caractériser l'évolution spatiale et temporelle de la turbidité.

Au-delà de l'étude des processus physiques *stricto sensu*, les interactions entre les compartiments physiques, (bio) géochimiques et/ou biologiques (que ce soit à l'échelle des individus, des populations ou même des communautés) ont été largement étudiés. Il s'agit par exemple du rôle des bactéries dans la dégradation de la matière organique terrestre, de l'exportation du microphytobenthos en zone intertidale, de l'advection océanique des sargasses (dispersion, échouage) ou encore du lien entre turbulence et taux de rencontre du zooplancton. Le niveau de réalisme des simulations numériques apparaît maintenant suffisant dans de nombreuses zones côtières (y compris les zones d'upwelling) pour permettre un couplage physique - biologie concernant les questions de rétention, connectivité, dispersion de larves, etc.

La zone critique des environnements littoraux et côtiers a aussi été étudiée sous l'angle des cycles biogéochimiques et de leur couplage avec l'écologie, de façon intégrée dans le temps et/ou dans l'espace. Par exemple, des bilans de carbone ont été réalisés dans les zones de pied de canyons du Congo et dans l'estuaire du Sinnamary et un bilan d'ammonium en estuaire tropical eutrophisé, les échanges de CO₂ entre atmosphère et plateaux continentaux ont été calculés, l'origine de la matière organique particulaire a été quantifiée à l'échelle pluriannuelle et multi-écosystémique.

Au sein des systèmes côtiers, de nombreuses études ont porté sur la dynamique des processus et flux associés (différentes formes du carbone et de l'azote, matière particulaire, métaux) et sur les échanges aux interfaces (sédiment-air, eau-air, sédiment-eau, bassin versant - zone côtière). Ces études ont couvert une grande gamme d'échelles de temps (diurne, tidale, saisonnière, inter-annuelle ou pluri-décennale) et d'espace (de quelques cm² au multi-écosystème).

L'évolution décennale à pluri-décennale des compartiments abiotiques et biotiques et de leurs interactions, ainsi que, dans certains cas, leurs forçages climatiques ou anthropiques, est maintenant mieux connue. Ces résultats ont été rendus possibles grâce à l'exploitation des données *in situ* des services d'observation et des données satellitaires, parfois combinées à la modélisation statistique ou déterministe. De tels travaux ont été menés sur tous les compartiments du continuum, de l'estuaire tidal aux marges, et ont pu concerner des études mono-(éco)systémique comme multi-(éco)systémiques à l'échelle d'une ou de plusieurs façades maritimes, voire à l'échelle globale. Ces travaux ont concerné notamment les débits, le transport sédimentaire,

l'oxygénation et l'acidification des zones côtières, les contaminants métalliques, l'influence des événements extrêmes sur les compartiments physico-chimiques et biologiques, la phénologie des efflorescences et des successions planctoniques, la compétition entre producteurs primaires vis-à-vis des nutriments. Des études multi-(éco)systémiques ont permis notamment de définir des typologies de fonctionnement et/ou d'évolutions pluri-décennales des (éco) systèmes.

L'INTERFACE ZC-ATMOSPHÈRE

Les flux à l'interface

Les flux aux interfaces impliquent différents types de surfaces continentales. Les cultures, les milieux urbains, les régions rurales, sont très influencées par les activités humaines alors que d'autres comme les déserts, les forêts, les savanes ou les surfaces aquatiques le sont très peu. Les études menées aux interfaces nécessitent donc une approche couplée environnement-société.

Les émissions de Composés Organiques Volatils Biogéniques (COVB) par les cultures agricoles ont constitué un nouvel axe de recherche émergent. Les mesures montrent par exemple une sensibilité à la sénescence des plantes. De nombreux composés non identifiés contribuent aux échanges de COVB entre les cultures et l'atmosphère. Les émissions de NH₃ par les cultures sont aujourd'hui relativement bien quantifiées, et participent efficacement à la formation d'aérosols organiques secondaires. Les pratiques agricoles modifient aussi les surfaces elles-mêmes et entraînent une variabilité spatio-temporelle importante qui complique la détermination des flux.

Les émissions d'aérosols terrigènes par érosion éolienne en zones arides et semi-arides sont étudiées depuis plusieurs décennies du fait de leurs impacts radiatifs, biogéochimiques, et sociétaux. Les processus d'émission de poussières, qui dépendent des propriétés de surface telles que la végétation, les pratiques agricoles et les déterminants micro-météorologiques (turbulence, stabilité atmosphérique, rafales...), sont désormais mieux connus. Les flux de sédiments et de nutriments biodisponibles associés aux émissions et aux dépôts de ces particules ont été quantifiés, ce qui a permis d'estimer l'effet de l'érosion sur la fertilité des sols en zone source et sur les cycles biogéochimiques en zone réceptrice.

La quantification des dépôts atmosphériques des espèces réactives et leurs spatialisations sont clé pour comprendre les interactions avec les cycles biogéochimiques et les impacts sur les écosystèmes. La génération de cartes à l'échelle globale de dépôts atmosphériques de composés clés (azote, soufre, ozone...) a été obtenue par fusion de modèles et données, en couplant les simulations atmosphériques avec les bases de données de dépôt humide et

de suivi des concentrations dans l'air. L'assimilation des observations satellitaires de l'indice de surface foliaire et de l'humidité superficielle du sol a permis d'améliorer la représentation du dépôt d'espèces chimiques sur les continents (par exemple dans le modèle SURFEX).

La caractérisation des émissions de gaz à effet de serre par des sources ponctuelles liées à des sites industriels, ou des zones urbaines, a été améliorée grâce à l'adaptation de méthodologies d'assimilation et à des observations issues de plateformes mobiles (drones). Les observations ont mis en évidence l'accélération de l'augmentation du méthane atmosphérique sous l'action de la croissance des émissions anthropiques (agriculture, déchets et hydrocarbures fossiles).

L'eau : débits et stock sur les continents

L'assimilation de produits satellitaires de contenu en eau du manteau neigeux dans l'outil Land Data Assimilation System (LDAS) a permis d'améliorer la représentation du débit des rivières dans les régions où la neige en plaine est fréquente (par exemple sur le bassin de l'Elbe).

L'amélioration de la représentation des transferts d'eau latéraux et du drainage dans le continuum sol – végétation – atmosphère a permis une meilleure représentation des flux d'énergie à l'interface entre surfaces continentales et l'atmosphère.

Lors d'un réchauffement climatique, les précipitations ont tendance à être plus intenses et moins fréquentes (par exemple dans le Golfe de Guinée en Afrique), favorisant ainsi les événements extrêmes et les risques d'inondation. En région méditerranéenne, en automne par exemple, la tendance des événements extrêmes est largement positive et expliquée par des changements dans les influences atmosphériques dominantes. La mesure des événements pluviométriques extrêmes à haute résolution spatio-temporelle a amélioré la compréhension du risque d'érosion des sols.

Anthropisation et écosystèmes vulnérables

L'action humaine entraîne des risques pour la biodiversité et les ressources en eau dans les écosystèmes extrêmes, considérés comme vulnérables (comme les tourbières). Des modifications des cycles biogéochimiques peuvent entraîner des pertes en nutriment (dégradation des sols, risques liés à la sécurité alimentaire dans les zones pauvres en nutriments), ou au contraire des pertes de biodiversité liées à des dépôts massifs de polluants dans les zones à forte activité humaine. En paléoclimatologie, les techniques de mesures isotopiques moléculaires dans les sédiments ont démontré l'influence des bouleversements environnementaux hydroclimatiques sur les écosystèmes de tourbières notamment, avec un impact sur le cycle du carbone tropical au cours de l'Holocène.

Dynamiques des contaminations

Le développement d'inventaires d'émissions anthropiques globales, régionales et urbaines a été poursuivi dans le cadre de Copernicus/CAMS, avec le développement d'inventaires de gaz à effet de serre. Sur le continent africain, ceux-ci montrent une augmentation très importante (entre 86 et 130 %) des émissions de polluants entre 1990 et 2015, l'Afrique de l'ouest étant la principale région émettrice.

Dans les régions urbanisées sensibles (villes de la Méditerranée de l'est; Afrique de l'ouest), l'évaluation des inventaires des émissions anthropiques des précurseurs de l'ozone s'appuie sur les observations *in situ* de ces composés, sur la mise en œuvre d'approches source-récepteur et d'outil diagnostiques de type rapports à l'émission. Les émissions dans ces régions sont systématiquement sous estimées jusqu'à deux ordres de grandeur. Ces études s'appuient sur des campagnes de mesure dédiées adossées à de grands programmes (ChArMEx/MISTRALS ou DACCWA).

L'analyse de plus de 20 ans de données de l'infrastructure de recherche IAGOS a permis de mettre en évidence les tendances long-terme de l'ozone à l'échelle régionale. Sur la base de l'analyse de moyennes mensuelles d'anomalies d'ozone, il a été montré que ces tendances étaient dues aux changements des émissions de précurseurs d'ozone et au changement climatique plutôt qu'à la variabilité naturelle du climat. En Europe, cette tendance est positive dans la troposphère et corroborée par des mesures récentes de sondes d'ozone.

La pandémie de Covid19 a permis d'analyser, à grande échelle, les impacts de diminution des contaminants, comme par exemple la baisse des précurseurs qui a entraîné, pour la première fois depuis 2014 une anomalie négative d'ozone dans la troposphère libre. La croissance atmosphérique record du méthane en 2020, peut-être expliquée pour moitié par cet effet Covid19, la baisse de ses puits radicaux ayant été affaiblie par la baisse des émissions de NOx, l'autre moitié étant liée à l'augmentation des émissions des zones humides.

Interactions entre ville, qualité de l'air et climat urbain

L'urbain a été identifié comme un chantier central de recherche interdisciplinaire dans la prospective transverse de l'INSU. L'adaptation des villes au changement climatique est un enjeu crucial avec des questions variées allant de l'habitabilité, la santé, l'alimentation en eau, l'alimentation et la consommation d'énergie, la biodiversité ou encore les transports. Pour la communauté OA, les études en lien avec la qualité de l'air, les épisodes de canicules, le rôle de la végétation, ont été menées ces dernières années avec une ouverture vers les autres disciplines. L'observation via les chambres de simulation, les réseaux de mesure (IR ACTRIS,

ATMO, Météo-France, satellites) et des campagnes de mesures dédiées a été menée en parallèle avec des travaux de modélisations avec des échelles spatiales et temporelles variées. Ceux-ci ont conduit à réfléchir à la descente en échelle de ces modèles et des observations pour représenter l'air à l'échelle de la rue ou dans les habitations. Le modèle de ville Town Energy Balance (TEB) par exemple a permis l'intégration des arbres de rue, la modélisation des usages et des comportements en termes de chauffage et climatisation, de flux de CO₂, et d'échanges radiatifs. Les simulations à échelle métrique avec le modèle communautaire MesoNH ont permis d'améliorer les paramétrisations de TEB sur les forces de traînée de la canopée urbaine qui sont utilisées à résolution hectométrique. Ces travaux sont essentiels pour déterminer les politiques d'adaptation des villes face à l'évolution prévue des vagues de chaleur avec le changement climatique, et pour l'évaluation des effets de scénarios d'expansion urbaine et de stratégies de verdissement des villes sur l'îlot de chaleur urbain, sur le confort thermique et la consommation d'énergie, grâce à la conception de méthodes de descente d'échelle des forçages météorologiques à des échelles infra-urbaines. La communauté OA a poursuivi le développement de modèles urbains intégrés (incluant la mobilité des personnes) rendus nécessaires pour fournir des diagnostics sur la qualité de l'air et participer aux décisions politiques d'atténuation, l'aspect socioéconomique apparaissant comme facteur déterminant sur les choix de mobilités.

Le besoin de documenter la ville à l'échelle de la rue a conduit à développer de nouvelles approches d'observation complémentaires des réseaux existants. Ainsi, la combinaison de données issues des stations de mesures et de données recueillies via les voitures connectées personnelles ont permis d'améliorer la représentation de l'îlot de chaleur urbain sur l'agglomération parisienne. Ces données sont aussi exploitées pour produire des données urbaines à l'échelle du quartier sur l'ensemble de l'Europe.

Dans le domaine de la qualité de l'air, des indicateurs de l'exposition sanitaire basés sur le stress oxydant ont été développés pour évaluer le potentiel oxydant (PO) des aérosols (capacité des particules à oxyder le milieu pulmonaire), afin d'établir le lien entre la chimie des sources d'émissions de particules et leurs effets sur la santé. La contribution des différentes sources de particules au PO observé, ainsi que leur « nocivité » relative, a mis en évidence que la part prise par chaque source dans la déconvolution du PO n'est pas du tout proportionnelle à la contribution de la concentration massique des particules. Ainsi, en France et en Europe, la combustion de la biomasse et les émissions véhiculaires sont les principales sources de particules associées aux variations temporelles de PO. Il est donc important d'accompagner la réglementation en ciblant les sources responsables des effets sanitaires plutôt que celles contribuant fortement à la masse mais peu au stress oxydant. L'impact des émissions anthropiques sur la qualité de l'air et la santé

a également été mis en évidence dans les villes africaines, notamment grâce aux études de l'impact inflammatoire de l'aérosol urbain (*in vitro* et potentiel oxydant).

Des études ont également été menées sur la dynamique atmosphérique au-dessus des villes. La hauteur de la couche limite atmosphérique définit le volume d'air dans lequel la chaleur, l'humidité et les polluants libérés à la surface de la Terre sont dilués. Il est donc important pour un large éventail d'applications, y compris l'interprétation de la qualité de l'air, la prévision météorologique numérique, l'évaluation des gaz à effet de serre et les énergies renouvelables, entre autres. Pourtant, les connaissances quantitatives sur la variation temporelle et spatiale de la hauteur de la couche limite atmosphérique restaient rares. Grâce aux progrès récents de la technologie de mesure de télédétec-





tion au sol et du développement d'algorithmes, le profilage continu de toute l'étendue verticale de cette couche limite, et ce à haute résolution temporelle et verticale, est désormais possible.

Des mesures de laboratoire viennent compléter les observations de terrain et les modèles. La complexité des atmosphères polluées a pu être simulée grâce au développement de protocoles en chambres de simulation atmosphérique équipées pour reproduire et contrôler les processus atmosphériques. L'objectif est l'estimation de l'impact de la pollution pour des situations réalistes d'exposition.

Lâcher d'un ballon sonde dans l'atmosphère pour un radiosondage sur les bords de Seine, à Paris, durant la campagne de mesures Paname 2022. Ce ballon emporte une sonde dans l'atmosphère à plus de 20 000 mètres d'altitude puis explose. Pendant la montée et la descente sous parachute, la sonde qui est accrochée au ballon acquiert la température, l'humidité et la pression de l'atmosphère. Ici, l'objectif est d'évaluer les modèles numériques atmosphériques calculant les conditions météorologiques au-dessus de la ville. L'ensemble des projets initiés durant cette campagne permettra de mesurer également les gaz à effet de serre, certains composés réactifs gazeux et particulaires, ainsi que la dynamique atmosphérique, dans Paris et sa banlieue. Il s'agit, grâce à l'analyse de ces données, de mieux comprendre les effets de la ville sur le climat local, en particulier sur l'îlot de chaleur urbain, et de mieux représenter les flux d'énergie et de matière à l'interface sol/atmosphère dans les modèles.

©Cyril Fressillon / CNRS-Image

Les nouvelles frontières avec le vivant

Ce thème émerge lors de la dernière prospective a depuis pris une place importante dans les recherches en biogéochimie marine. L'objectif principal était de mieux comprendre le rôle du vivant dans les grands cycles biogéochimiques, et était guidé par deux questions: (1) Comment les structures et diversités de communautés régulent-elles les flux des éléments majeurs et éléments traces? (2) Comment l'étude des cycles biogéochimiques peut-elle tirer profit des bouleversements technologiques - notamment en omiques, imagerie et isotopie? Les études menées ces dernières années sur ce thème peuvent se décliner sur 3 axes représentant différentes échelles.

L'énorme quantité de données issue de ces nouvelles technologies et des méthodes d'observation de plus en plus automatisées (ex. flotteurs) est une excellente opportunité pour ce domaine de recherche mais requiert en même temps le développement des approches d'analyse de données appropriées. Ceci est aussi vrai pour l'intégration de ces données dans les modèles biogéochimiques qui a commencé et prendra sans doute plus d'ampleur dans un futur proche.

LES ÉTUDES À L'ÉCHELLE DE L'ORGANISME INDIVIDUEL

Le développement de nouvelles méthodologies ou l'appropriation d'outils et d'approches d'autres disciplines ont permis d'étudier des processus spécifiques à un élément majeur ou trace à l'échelle de l'organisme individuel. Grâce à l'utilisation des ressources et outils génétiques (bactéries génétiquement modifiées), les voies métaboliques impactées par la limitation en nutriments (ex. fer, phosphore) ont pu être identifiées et les conséquences sur le métabolisme cellulaire du carbone ont pu être déterminées. L'imagerie à haut débit a permis une meilleure connaissance de la distribution et du rôle des rhizaires (des unicellulaires marins peu étudiés jusqu'à présent) dans la pompe biologique du carbone et le cycle biogéochimique de la silice. Les rôles spécifiques des diatomées et des cyanobactéries dans le cycle biogéochimique du soufre ont été étudiés par une approche transcriptomique sur des organismes modèles en cultures contrôlées. L'intérêt de ces nouvelles approches pour analyser les facteurs de contrôle tels que la limitation par la lumière par rapport aux nutriments a été également mis en évidence pour divers micro-organismes mixotrophes.

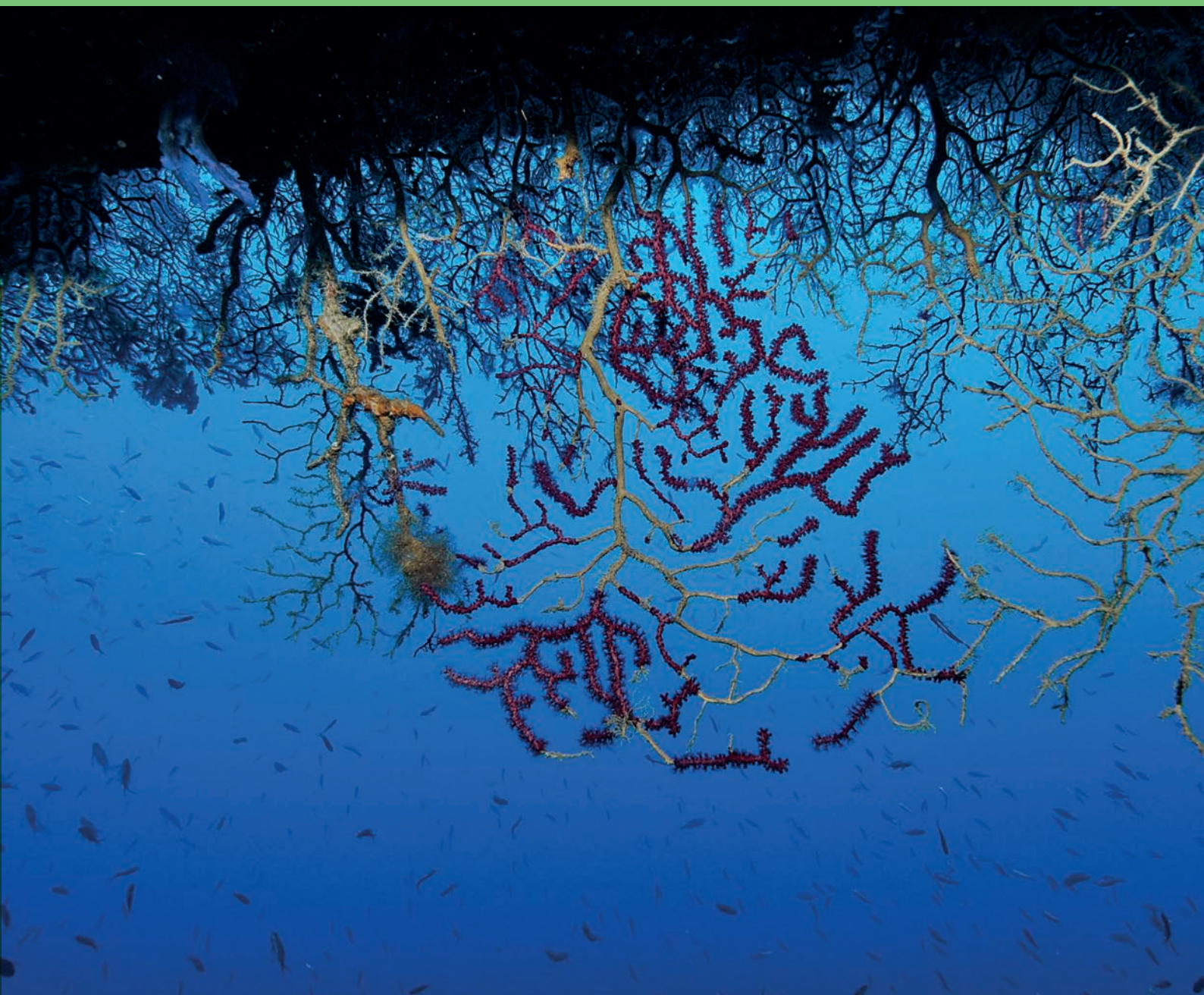
LES COMMUNAUTÉS BIOLOGIQUES EN INTERACTION AVEC LEUR ENVIRONNEMENT

Une question majeure abordée au cours des dernières années a porté sur l'influence de l'environnement sur la com-

Gorgone rouge, «*Paramuricea clavata*», mourante, à l'instar de nombre des individus entre 10 m et 30 m de profondeur (Parc national des Calanques). L'urgence climatique ne concerne pas uniquement les milieux terrestres. La canicule marine de l'été 2022 a été la plus longue et la plus intense jamais enregistrée, avec un différentiel de 4 à 5 °C au-dessus de la normale et les forêts marines ont aussi largement souffert de la chaleur. Or ces «forêts animales» de gorgones sont un écosystème clé qui abrite 15 à 20% des espèces en mer Méditerranée. Avec une croissance de quelques centimètres par an seulement, il faudra des décennies pour les restaurer.

© Frédéric ZUBERER / CRIOBE / MIO / OSU Pytheas / CNRS Images

position des communautés, ainsi que sur les rétroactions des changements de communautés en termes de diversité sur les flux biogéochimiques. Plusieurs facteurs de contrôle ont été considérés, de manière individuelle ou combinés, comme l'impact de l'acidification sur les communautés benthiques et les rétroactions sur les flux sédiment-colonne d'eau, ou l'influence combinée de la température, l'acidification et de l'environnement physique à petite échelle sur la composition des communautés phytoplanctoniques et les conséquences sur la production primaire. À plus grande échelle, une étude *in situ* a identifié l'effet des sources hydrothermales sous-marines sur les communautés pélagiques et leurs conséquences sur l'export de carbone (ex. campagne TONGA). De même, l'impact des fontes de glace a été montré comme critique par le stress osmotique sur les communautés bactériennes et leur activité, et également par le rôle des apports fluviaux aux communautés benthiques côtières et pélagiques.



VARIABILITÉ SPATIALE ET TEMPORELLE

Une meilleure connaissance de la variabilité spatiale et temporelle de la biodiversité est essentielle pour la compréhension du fonctionnement des cycles biogéochimiques. Décrire la composition des communautés à haute résolution spatiale ou temporelle et associer ses modifications aux cycles des éléments est clef. La mise en œuvre des dispositifs de fixation de l'ADN pour des analyses de diversité, couplés à la mesure de fixation d'azote à haute résolution, a permis d'explorer les niches spatiales des diazotrophes à fine échelle. L'imagerie acquise par des capteurs sur des instruments autonomes a pu fournir des informations en haute résolution des caractéristiques des particules non-vivantes, ainsi que l'identification de certains organismes planctoniques. En effet, les données obtenues par des flotteurs BGC-Argo ont permis de décrire la variabilité spatiale des groupes fonctionnels du phytoplancton. L'étude des

processus de minéralisation de la matière organique en cours de chute dans le domaine mésopélagique a pu faire des avancées significatives avec des moyens tels que les bouteilles hyperbares ou le 'marine snowcatcher'. Ces outils permettent une meilleure compréhension du rôle des communautés procaryotiques associées aux particules en cours de chute dans la colonne d'eau, ainsi que du devenir (reminéralisation) de ces particules tout au long de leur sédimentation dans la colonne d'eau. La variabilité temporelle de l'export du carbone et des éléments traces et des acteurs biologiques qui y contribuent a pu être étudiée grâce au développement d'un préleveur autonome d'échantillons dans la colonne d'eau couplé à des pièges de particules. Ces outils sont particulièrement pertinents dans des sites peu accessibles, donc sous-étudiés.

Études régionales intégrées

La nécessité de mener des études régionales intégrées ont conduit au cours des quinze dernières années à structurer des implications durables de communautés d'horizons et de disciplines diverses sous forme de chantiers régionaux inter-organismes pilotés par le CNRS-INSU. Ce fut le cas en particulier pour la Méditerranée (chantier MISTRALS, lancé en 2010, achevé en 2020 et réparti en 6 grands sous programmes : HYMEX, MERMEX, CHARMEX, PALEOMEX, SICMED, BIODIVMED) ou pour l'Arctique (Chantier Arctique Français), lancé en 2015. Pour l'Antarctique, il n'y a pas eu une structuration définie, mais des initiatives de groupes de réflexion ont vu le jour au cours des années 2015-2020.

LE CHANTIER MISTRALS

Soutenu par un grand nombre d'organismes (CNES, Ademe, CEA, CNES, IFREMER, INRAE, l'IRD et Météo-France), MISTRALS s'est achevé avec la conférence Med2020 à Marseille au cours de laquelle les principaux résultats scientifiques ont été présentés et pour la plupart ont fait objet de publications d'articles pour le grand public. Des tables rondes avec des acteurs du monde non académique et des décideurs ont également été organisées.

Au cours de la période 2016-2020, les données des expériences de terrain ont été collectées et versées dans une base de données ouverte (AERIS/SEDOO). Le chantier MISTRALS a conduit à la publication de plus de 1000 articles scientifiques (HYMEX, environ 500, MERMEX et PALEOMEX environ 200, CHARMEX environ 180).

Les activités « transverses », objectif de la deuxième phase du chantier, se sont concentrées sur la modélisation, en particulier climatique. L'exploitation de simulations climatiques régionales HyMeX/MED-CORDEX a ainsi alimenté la rédaction du 1^{er} rapport d'évaluation du MedECC sur l'évolution du climat et de l'environnement en Méditerranée. Les programmes CHARMEX et MERMEX ont évalué l'accumulation et le transfert d'une large gamme de contaminants aux interfaces atmosphère/eau/plancton, à travers les rivières, les eaux souterraines, les villes ou les ports, ainsi que leur transport vers la haute mer, et leurs impacts sur les écosystèmes côtiers (campagne HIPPOCAMPE). Des campagnes océanographiques (i.e. PERLE 1 à 4, PEACETIME), organisées avec une importante participation étrangère, ont aussi complété le dispositif expérimental, notamment dans des régions très peu échantillonnées. Le format chantier a été un élément du succès du programme MISTRALS. Cette structuration a permis de construire une vision holistique des problématiques environnementales dans cette région très vulnérable au changement climatique et aux autres forçages anthropiques. En plus d'avoir structuré une com-

munauté française et internationale autour de la Méditerranée (avec d'importantes sources de co-financement qui ont doublé, voire triplé la contribution initiale du chantier), MISTRALS a permis d'initier des activités transverses, multi- et trans-disciplinaires, qui se sont avérées extrêmement importantes, notamment vis-à-vis des décideurs (i.e. conférence Med2020).

CHANTIER ARCTIQUE FRANÇAIS

Le Chantier Arctique Français (CAF) visait à structurer la communauté de recherche française, à promouvoir la recherche interdisciplinaire et à stimuler l'émergence de nouveaux projets. Un appel à projets a permis de financer deux projets. Le premier sur la pollution dans le système Arctique (CAF-PARCS, ~40 publications) a conduit notamment à caractériser les émissions de polluants locaux, le cycle du mercure, les aérosols marins organiques, et les interactions aérosols-nuages en région arctique. Le deuxième projet a porté sur la biogéochimie marine (CAF-GREEN-EDGE) avec un important effort de terrain. Il a conduit à plus de 50 publications, notamment sur les efflorescences de phytoplancton en hiver et la croissance des émissions de diméthyl-sulphide. Lors d'un colloque de restitution ouvert à l'ensemble des équipes travaillant sur ces thèmes a émergé l'idée d'une initiative polaire intégrant l'Arctique et l'Antarctique. Du point de vue de la structuration des communautés, le CAF a permis l'émergence de questionnements scientifiques à l'interface des disciplines (au-delà d'OA et de l'INSU) et aussi d'élargir la communauté arctique en attirant des équipes travaillant initialement sur d'autres régions géographiques.

Au-delà du CAF, des initiatives fédératrices se sont développées dans la durée, souvent dans un cadre pluridisciplinaire où les thématiques OA jouent un rôle central. Par exemple, un colloque franco-sibérien sur les environnements sibériens organisé en 2019 a mis en évidence l'intérêt de ces collaborations sur le long-terme initiées à partir des outils du CNRS à l'international (ex. LIA YAK-AEROSIB).

Une spécificité de l'Arctique est son caractère hautement stratégique qui expose la recherche aux aléas géopolitiques et la place au cœur d'enjeux diplomatiques. Dans l'océan Arctique central, la Russie détient près de la moitié du trait de côte et exerce sa juridiction sur une majorité des plateaux continentaux, ce qui dans le contexte géopolitique actuel est à prendre en compte. La communauté de recherche est ainsi régulièrement sollicitée (appui aux rencontres ministérielles arctiques, aux groupes experts du Conseil de l'Arctique pour des rapports d'évaluation internationaux...) et est amenée à répondre à une demande sociétale parti-

culièrement forte, avec des enjeux relatifs à la coopération avec les populations autochtones.

ANTARCTIQUE

Il existe en France une importante communauté de recherche OA sur l'Antarctique. Elle est actuellement structurée au travers de projets soutenus par les programmes nationaux (LEFE, TOSCA...), l'ANR (dans son programme blanc) et l'IPEV, des dispositifs d'observation à long-terme en zone subantarctique et en Antarctique, mais aussi au travers de projets européens (pour certains avec une coordination française) et internationaux. À la différence de l'Arctique, en 2016 l'Antarctique n'a pas fait l'objet d'une prospective portée par l'ensemble de la communauté OA. La prospective 2017-2022 faisait état qu'une meilleure

structuration de la communauté antarctique était incontournable pour répondre à la forte volonté des acteurs de la recherche, et aux défis logistiques associés à l'étude de cette région du globe. Certaines synergies se sont développées autour de chantiers géographiques, favorisées par la mutualisation d'infrastructures polaires (stations antarctiques, campagnes à la mer).

Sur la période 2017-2022 la recherche française en Antarctique disposait de deux stations permanentes Antarctiques (Dumont d'Urville sur la côte et Concordia en cogestion avec l'Italie sur le plateau Antarctique), d'une caravane scientifique permettant le déploiement d'activités de recherche dans les zones à proximité (quelques centaines de km), des stations permanentes et d'un bateau polaire ravitailleur l'Astrolabe. Les stations subantarctiques des Terres Aus-



Avancée du canoé des glaces dans la banquise morcelée du détroit de Jones (Jones Sound), au Canada. Les scientifiques déploient des bouées « wave-buoy » sur la banquise lâche afin de mesurer le déplacement et la déformation de la banquise dus aux vagues. Le canoé, dont la forme particulière est conçue historiquement au Québec pour les déplacements sur eau et glace, est équipé d'un instrument de mesure d'épaisseur de glace par induction. Il est utilisé pour l'échantillonnage et les mesures d'océanographie physique durant la mission Dark Edge dédiée à l'étude des efflorescences automnales de phytoplancton (blooms phytoplanctoniques) dans l'océan Arctique canadien.

© Claudie MAREC / IUEM / Takuvik / CNRS Images

trales et Antarctiques Françaises (îles de Crozet, Kerguelen, Amsterdam) et le navire océanographique Marion Dufresne complètent le panorama et donnent à la France une position unique dans l'hémisphère sud, avec une capacité d'étudier cet hémisphère, de l'île de la Réunion au Pôle Sud.

Forte de ces infrastructures, la recherche polaire antarctique française a conduit plusieurs programmes de recherche et services d'observation touchant au domaine OA et couvrant l'entière du continuum atmosphère-neige-glace-océan. Ce continuum est abordé à travers l'étude de la météorologie polaire, de la chimie atmosphérique réactive, des aérosols, de la vapeur d'eau et des précipitations, de la physique de la neige, du bilan de masse de surface (SNO GLACIOCLIM), des interactions glaciers-atmosphère, de la gestion des carothèques (archives EPICA), la surveillance de la stockage de chaleur, du carbone et de l'eau douce dans l'océan (e.g. SNO OISO, SURVOSTRAL), les questions climatiques étant le fil directeur de tous ces programmes. À ce titre, nous relèverons quelques points saillants et avancées auxquelles notre communauté a contribué sur la thématique du changement climatique comme :

- Première sur la reconstruction de l'historique des éruptions stratosphériques à partir de l'analyse isotopique du sulfate contenu dans la glace
- Mise en évidence de l'importance des rivières atmosphériques dans la fonte de surface de l'Antarctique malgré leur faible occurrence
- Mise en évidence du rôle joué par la productivité primaire dans le contrôle des concentrations de CO₂ durant les cycles glaciaires-interglaciaires
- Construction d'un nouveau traceur de l'accumulation de neige indépendant des isotopes de l'eau
- Caractérisation précise de l'état chimique de l'atmosphère (de sa capacité oxydante) et de l'origine des aérosols à Dumont d'Urville et à Concordia.

Derrière ces études de fond, quatre importants programmes sont venus structurer ce paysage impliquant une large part de la communauté polaire française: l'ERC SUBGLACIOR et son développement technologique de forage, l'ERC ICORDA et ses nouvelles approches de datation de la glace, le projet européen Beyond EPICA autour de la transition climatique du pléistocène moyen dont le forage profond vient de débiter et le raid scientifique EAIIST qui a parcouru les champs de mégadunes à quelques 600 km au sud de Concordia. Enfin, notons que sans le soutien logistique de l'Institut Polaire Français (IPEV), aucune science ne serait possible au pôle sud. Or, ces dernières années une constante et continue dégradation des ressources de cet institut conduit inexorablement à un décrochage des infrastructures et des capacités de recherche française dans cette partie du monde, pourtant essentielle à l'avenir climatique de notre planète.





Caravane du raid EAIIST quittant la base Concordia, sur le plateau antarctique. Des membres de la base assistent à son départ vers les méga-dunes de l'Antarctique, une formation de glaces. Le projet EAIIST (East Antarctic International Ice Sheet Traverse) étudie les dimensions (géo)physiques, chimiques et paléoclimatiques du plateau Est de l'Antarctique. Relevés météorologiques, prélèvements de neige et de glace, mesures sismiques et radar, etc. sont réalisés au cours d'une traversée terrestre entre la base Concordia et le pôle Sud. Le projet s'intéresse aux conditions hyperarides de cette zone, en étudiant des structures uniques comme les méga-dunes ou les surfaces vitrées. Il s'agit aussi de mieux appréhender la masse d'eau de l'Antarctique de l'Est, afin de prédire son rôle dans la montée du niveau des mers, dans un contexte de changement climatique.

© Pete Akers/Trinity College Dublin/CNRS Images

Instrumentation, développements

L'instrumentation est centrale dans les domaines des sciences de la Terre et de l'Univers, pour l'observation à long terme, les missions spatiales, et les campagnes de terrain (océanographiques, aéroportées, etc.). Ces instruments doivent être robustes et effectuer des mesures de qualité sur de longues périodes. Ils sont souvent soumis à des spécifications strictes en matière de consommation d'énergie, de limitation de poids, et de capacité à pouvoir collecter et transmettre des mesures *in situ* ou à distance en temps réel ou/et différé. Les progrès technologiques pilotés par la communauté OA ont porté sur des axes de suivi long terme au sein de services labellisés, complétés par le développement de nouvelles instrumentations. Ces progrès ont été accompagnés par la Division Technique de l'INSU (DT INSU) et plus récemment la DIIRO (direction adjointe de l'INSU de développements instrumentaux innovants pour la recherche et l'observation), avec comme enjeu l'intégration dans les services d'observations et laboratoires de dispositifs innovants, adaptés aux questions scientifiques soulevées par la prospective.

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

Durant ces dernières années, un niveau significatif d'harmonisation a été atteint au sein de la communauté OA en termes de certification et de labellisation des instruments, des sites de recherche et des réseaux d'observation. Cette harmonisation des processus de certification a été étendue aux autres domaines de l'INSU.

Au cours des 6 dernières années, l'INSU a structuré au niveau national les services d'observation, les instruments et outils numériques. Ainsi les services nationaux d'observation (SNO) sont dédiés à l'observation de l'atmosphère et de l'océan, avec pour mission d'apporter un soutien à la communauté scientifique en produisant des données accessibles, étalonnées, documentées, et de haute qualité. En plus des sites d'observation, il existe également des instruments nationaux (IN), développés et opérés par des laboratoires spécifiques et mis à la disposition de la communauté grâce au soutien de l'INSU. Parmi ces instruments nationaux, on peut citer les plateformes aéroportées RALI (Radar-Lidar) du LATMOS, la PMA (plateforme de mesures aéroportées) du LaMP ou encore l'unité mobile au sol PE-GASUS (Portable Gas and Aerosol Sampling Units) du LISA, qui consistent tous en une série d'instruments de pointe qui peuvent être déployés lors de campagnes de terrain. En général chaque service apporte avec lui des ingénieurs formés

qui aident au déploiement et à l'opération des instruments, et à l'analyse de leurs mesures.

Grâce à un ensemble de procédures opérationnelles standard bien définies, les SNO s'assurent de l'interopérabilité, de l'intercalibration, et de la maintenance d'une filière d'instruments pour contribuer à un système intégré d'observation de l'océan et de l'atmosphère, tant en métropole qu'en outre mer. En fournissant un service fiable et de qualité à la communauté française, ils augmentent l'attractivité de leurs sites et des observations françaises auprès de la communauté internationale. Ces sites, SNO, et plateformes exploratoires sont les briques de base des infrastructures de recherche telles que IAGOS (In-service Aircraft for a Global Observing System), ACTRIS (Aerosols, Clouds and Trace Gases), ICOS (Integrated Carbon Observation System) ou encore EMSO (observation des fonds océaniques). Le parc national d'instrumentation océanographique (PNIO), porté par la DT INSU, les navires de stations et les navires océanographiques de la flotte océanographique française (FOF) permettent la réalisation de nombreuses campagnes océanographiques et le maintien d'observations pérennes pour le suivi climatique dans le cadre de SNOs (MOOSE, PI-RATA, SOMLIT, SSS, COOL...).

L'instrumentation de vecteurs autonomes (flotteurs profilers Argo, gliders) est devenue une composante primordiale des systèmes d'observation dans l'océan. La force de ces plateformes réside dans la large gamme d'échelle (spatiale et temporelles) couverte qui permet de compléter les observations réalisées par les mouillages et les navires océanographiques.

DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES TECHNIQUES D'OBSERVATION

L'intérêt constant pour les observations sur le long terme dans des régions éloignées a encouragé plusieurs équipes à développer et à tester de nouvelles techniques dans divers domaines de la composition atmosphérique et de l'océanographie. Les projets en cours s'orientent vers des systèmes à faible coût et consommant le minimum d'énergie. Les domaines d'application sont multiples allant de la mise en place de réseaux d'instruments en milieu urbain à l'étude du plancton en s'appuyant sur la science participative. La volonté d'accéder aux régions difficiles d'accès ou extrêmes (régions polaires, océan profond, stratosphère...) a suscité également un développement technologique innovant.

Les développements dans le domaine OA des dernières années ont vu une accélération de l'activité liée à la me-

Vue du container de mesures atmosphériques PEGASUS installé sur le navire de recherche le « Pourquoi Pas ? » pendant la campagne en Mer Méditerranée PEACETIME en mai 2017. PEGASUS est un ensemble de containers (observatoire et laboratoire) équipés pour caractériser les gaz et aérosol atmosphériques in situ et sur la colonne. Plateforme mobile de l'IR ACTRIS, PEGASUS est projetable sur le terrain, pour effectuer des campagnes intensives en synergie avec les avions de recherche, les bateaux ou encore en complément de stations pérennes. C'est un instrument national labellisé en 2021.

Lors de PeaceTime, il s'agissait de suivre les effets engendrés par les dépôts de particules atmosphériques sur les écosystèmes marins et sur le transfert de carbone. Pour cela, était déployé pour la première fois à bord d'un navire de recherche un ensemble de mesures physiques, chimiques et biologiques allant de l'atmosphère jusqu'aux couches profondes marines.

© Karine Desboeufs / LISA / EFLUVE / CNRS Image



sure « autonome ». En océanographie, on a vu la généralisation des capteurs miniatures et basse consommation (turbulence, acoustique active et passive, imagerie, capteurs bio-optiques et optiques d'oxygène dissous et nutriments, ...) pouvant être installés sur la quasi-totalité des plateformes autonomes (mouillages, flotteurs profileurs, gliders). Sur certaines plateformes, le nombre des capteurs développés a augmenté sensiblement (comme par exemple sur les flotteurs BGC-Argo qui permettent maintenant d'embarquer des capteurs de plus en plus complexes i.e. imagerie, radiométrie hyperspectrale). En atmosphère, ces capteurs permettent aussi bien à des mesures embarquées (avion, ballon, capteur marins) qu'à des réseaux de mesures sol qui permettent de mieux documenter des événements météorologiques extrêmes par exemple. Des technologies lidar de nouvelle génération ont été développées afin de répondre au besoin sociétal en lien avec les événements météorologiques extrêmes amplifiés par le dérèglement climatique.

D'ailleurs, l'amélioration de la qualité des images collectées en milieu marin en conjonction avec l'application de l'IA pour le traitement automatique de quantités massives de fichiers complexes a fortement augmenté l'information disponible (monocellulaire et imagerie, avec caractérisation de différentes espèces vivantes et fossiles de plancton dans l'océan). Ces développements de la reconnaissance automatique d'images sont également appliqués aux sciences de l'atmosphère (que ce soit pour l'identification de cristaux de glace dans les gouttelettes de nuages, d'aérosols biologiques).

La cytométrie en flux est aujourd'hui une technologie utilisée en routine pour les études d'écologie microbienne et de biogéochimie. L'implémentation de nouveaux photodétecteurs comme les photodiodes en avalanche a permis d'augmenter la résolution optique des cytomètres, et d'améliorer les capacités de détection des plus petites et/ou des moins fluorescentes des particules comme les virus. L'imagerie *in situ* ou *ex situ* a également vu son utilisation démocratisée avec des systèmes tels que les imageurs des systèmes UVP & Zooscan, le FlowCam pour la mesure et la classification d'organismes et de particules (de 20 à 200 μm), et pour le volet paléo, les automates d'imagerie en microscopie automatisée, et systèmes de tri (MiSo). Ces méthodes d'imagerie sont également avancées pour les mesures des aérosols biologiques suspendu dans l'atmosphère, où des particules individuelles peuvent être caractérisées par leur forme, leur taille, et leur propriété de fluorescence.

Au cours des cinq dernières années, les techniques de spectrométrie de masse disponibles sur le marché ont connu un essor considérable. Ces techniques ont permis d'identifier un large éventail d'espèces atmosphériques allant des espèces de taille nanométrique liées aux processus de formation, aux espèces hautement volatiles et aux espèces de volatilité inter-médiane, caractérisation impossible au-

paravant. Les nouvelles performances des instruments optiques peuvent concurrencer, voire dépasser, celles de la spectrométrie de masse, une technique beaucoup plus lourde et plus consommatrice d'énergie. La combinaison de techniques est également une voie d'avancées majeures de ces dernières années (MC-ICPMS avec cellule de collision et couplages associés, par exemple).

DÉVELOPPEMENTS EN COLLABORATION AVEC LA DT INSU

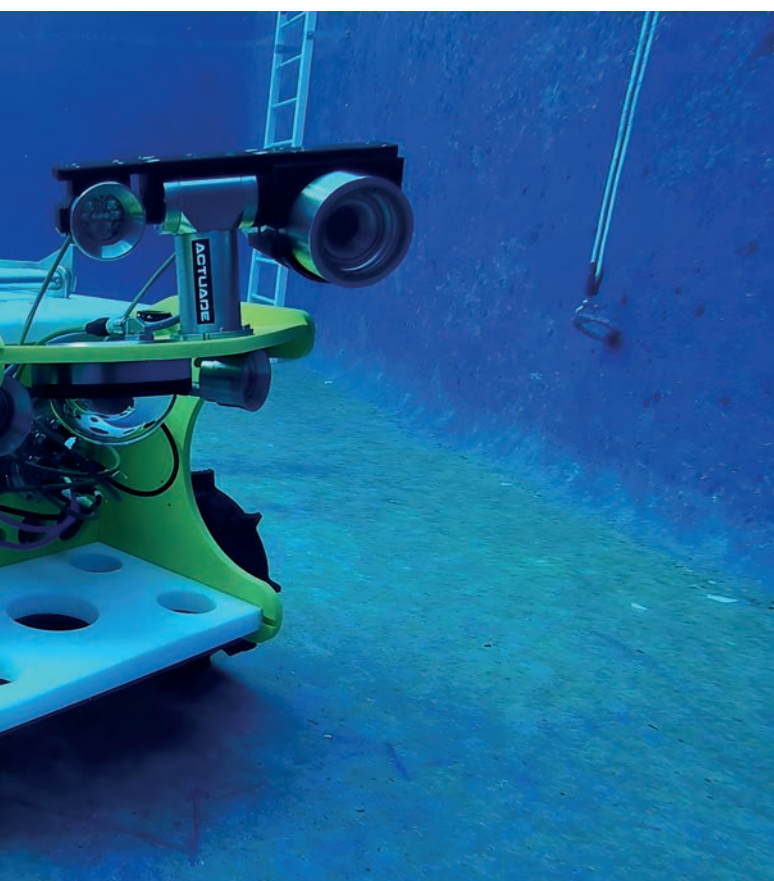
La division technique de l'INSU a contribué de manière significative au développement instrumental en soutien aux projets scientifiques de la communauté OA. La DT de l'INSU a accompagné les recherches sur l'atmosphère sur les interactions nuage-convection-dynamique, sur la sur-



Test en bassin du rover sous-marin benthique Bathy-Bot. Des essais sont réalisés à quelques mètres de profondeur avant de le déployer sur le site de l'observatoire sous-marin EMSO-LO, à 2 500 m de profondeur au large de Toulon. Ce robot d'exploration téléopéré via Internet est dédié au suivi sur le long terme de l'environnement, l'écologie et des potentiels impacts du changement climatique dans les grands fonds. Installé, il récolte des données environnementales (température, salinité, pression et courant) et biologiques. Sa caméra hypersensible lui permet notamment d'observer la bioluminescence émise par les organismes marins. Ces données viendront compléter les études ponctuelles réalisées lors de campagnes océanographiques, pour prendre en compte les variations saisonnières et éventuellement observer des phénomènes imprévisibles. L'objectif est de mieux comprendre les dynamiques biogéochimiques (la transformation de la matière organique sous l'effet de processus biologiques, géologiques et chimiques) en milieu profond. BathyBot est développé par l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO) et la Division technique de l'INSU du CNRS.

© Dorian Guillemain / Pytheas / CNRS Image

veillance de la composition atmosphérique, et le suivi de la variabilité de la vapeur d'eau (et les processus à l'origine de celle-ci) dans la troposphère par des développements en télédétection active LIDAR (e.g. LNG, μ DIAL). Ces développements, exploratoires ou en soutien aux IR IN-AIR et ACTRIS, ont consolidé la place de la communauté française sur cette thématique. Parmi les chantiers engagés amenés à se poursuivre, le Groupe Opérationnel National Lidar vise à assurer la jouvence, à harmoniser et automatiser le parc LIDAR du réseau français (NDACC), et de l'IR ACTRIS EU. Les développements accompagnés par la DT-INSU ont également porté sur des moyens aéroportés de l'IR IN-AIR, dans le cadre d'activité avion en lien avec les interactions aérosols-nuages et la surveillance de la composition atmosphérique ou sur les échanges entre stratosphère et troposphère grâce aux activités de ballons en lien avec les sondes



pico-STRAT ou encore les charges utiles mis en oeuvre lors des campagnes Strateole-2. Les activités de la DT-INSU ont également contribué à une meilleure caractérisation de la chimie atmosphérique et des aérosols, en préparation de la campagne ACROSS / PANAME notamment. L'expertise de la DT-INSU a enfin servi un projet de développements de capteurs multi-messagers pour un projet de sciences participatives.

Aux interfaces océan-hydrosphère et continentale/atmosphère, l'implication de la DT-INSU dans plusieurs projets

LA DIVISION TECHNIQUE DE L'INSU

Le développement d'instruments est au cœur des recherches de plusieurs laboratoires de l'INSU OA. La DT INSU apporte des compétences instrumentales et des capacités de production qui ne sont pas toujours disponibles dans les laboratoires et peuvent répondre à des besoins spécifiques. La DT dispose de nombreuses expertises autour des grands thèmes qui permettent le développement de nouveaux instruments, comme la mécanique, l'électronique et l'informatique, indispensables pour rester à la pointe de l'innovation.

Les demandes de soutien de la communauté OA à la DT-INSU ont augmenté d'un facteur de 2 à 3 au cours des 5 dernières années. Lors des derniers exercices de prospective du domaine OA, il a été souligné que la DT-INSU devait développer une position claire en termes de soutien en ressource humaine et le développement d'instruments, et clarifier l'implication à long terme sur les projets. Il a également été souligné qu'un bon équilibre entre les compétences disponibles et à développer au sein de la DT devait être maintenu.

La DT contribue par exemple de manière essentielle au développement de l'instrumentation embarquée sur les avions de recherche de la flotte SAFIRE/IN AIR en soutenant les laboratoires dans leurs développements (technologie lidar, instruments AVIRAD et PTR-MS pour la mesure *in situ* des aérosols et des composés organiques volatils). Dans le domaine des sciences atmosphériques, la DT a soutenu le développement d'outils de télédétection, le LIDAR en particulier (lidar Doppler aéroporté HSR LNG, lidar vapeur d'eau aéroporté LEANDRE 2, lidar WaVIL H2O/HDO et LEMON). Par ailleurs, le DT-INSU a apporté un soutien technique important aux instruments nationaux, dans le processus de renouvellement des stations lidar des réseaux NDACC et ACTRIS, notamment par la mise en place du National LIDAR Operational Group. Des progrès significatifs pour les projets liés aux mesures de la stratosphère avec des vecteurs mobiles tels que les ballons (Pico Strat Probes, et Strateole), ont été réalisés grâce à une collaboration avec le DT INSU.

Dans le domaine de l'océanographie, la DT INSU a contribué au soutien de projets tels que les systèmes AQUA-OXY, Bathy-Bot & BathyProf et la Station Benthique. À titre d'exemple, le BathyBot est un robot sous-marin déployé sur le site du site EMSO-Ligure Ouest à 2500 m en Février 2022. Un développement en cours BathyProf permettra après implémentation sur BathyBot de réaliser des profils d'oxygène pour l'étude du recyclage du carbone dans les sédiments en fond de mer, valorisant les développements de la DT INSU sur la station Benthique au large du Rhône. L'expertise de la DT INSU a aussi permis des développements originaux tels que la construction d'un DEEPNET (un filet à plancton inséré dans un corps de bouteille Niskin modifié), de la construction à l'achèvement du prototype, ou de ROMARIN (ROsette for Multiple mARine sNow Catchers). Enfin, la DT possède une expertise dans l'utilisation de la plateforme F2G pour le forage glaciaire et également dans l'utilisation de plateformes de carottage continentales et lacustres. Cette plateforme a été labellisée instrument national depuis 2022. Elle est également impliquée dans des projets de développement instrumental pour la nouvelle génération de forage glaciaire avec l'acquisition de données *in situ* au travers de la colonne de neige (SUBGLACIOR).

sur le niveau de la mer, par exemple avec le développement d'une nappe de mesure du niveau marin et d'un système de mesure de hauteur de mer par GPS et radar couplés, et de capteurs de marée ont permis d'avancer sur les connaissances de mesures altimétriques spatiales en amont de la mission spatiale SWOT. Le développement d'une plateforme instrumentée pour l'exploration littorale, préfigure les évolutions des moyens de suivi de la zone côtière, demandés par la communauté en lien avec l'IR* flotte océanographique française (FOF).

Enfin, la DT-INSU a permis de développer de nouveaux instruments sur le suivi de la pompe biologique avec des instruments dédiés à l'échantillonnage dans la colonne d'eau, notamment de neige marine, et de particules, mais aussi de caractérisation optique sur des gliders et flotteurs. L'expertise de la DT-INSU sur le développement d'instruments pilotables pour le suivi du milieu profond est largement mise en œuvre pour le suivi des échanges à l'interface eau/sédiments, et de la colonne d'eau. Le site EMSO-Ligure Ouest constitue un point focal des développements de la DT-INSU, de la surface aux sédiments, avec une panoplie d'instruments innovants en biogéochimie sur la bioluminescence, les flux de carbone, l'oxygénation notamment, reliés à des lignes de mouillages intégrant des systèmes de transmission de données novateurs.

OBSERVATIONS SPATIALES ET SYNERGIES ENTRE TYPES D'OBSERVATIONS

L'observation spatiale offre une capacité de caractérisation et de suivi des processus atmosphériques et océaniques, de leurs couplages et de leurs interactions avec le système Terre. En plus d'une couverture globale en temps réel ou différé, des échelles spatio-temporelles différentes, les missions spatiales, en constellation ou pas, fournissent les longues séries observationnelles nécessaires au suivi du changement climatique, de la pollution, de l'état physique, biogéochimique et écologique des océans, et de leurs impacts sur la vie humaine et le monde économique. En plus de leur apport pour les études scientifiques, les observations spatiales, disponibles quasiment partout, sont désormais assimilées dans des modèles opérationnels. L'observation spatiale est assurée avec des détecteurs passifs et actifs opérant de l'UV aux micro-ondes et utilisant différents principes de mesure. La communauté OA de l'INSU est non seulement impliquée dans l'exploitation scientifique des observations spatiales (par ex la constellation altimétrique SMOS, IASI, Sentinel) mais aussi dans la conception de nouvelles missions spatiales (par ex SWOT, IASI-NG, 3MI, CFOSAT, COMODO, C3IEL, CRISTAL, OdySEA) et de démonstrateurs aéroportés (par ex OSIRIS) mais aussi dans le développement d'algorithmes d'inversion et leur évaluation à partir de campagnes dédiées (e.g. MAGIC) et d'observations *in situ* atmosphériques et océaniques réalisées au sein de SNO (par ex SSS) et d'IR (e.g. Argo, ICOS, IAGOS, ACTRIS). Les bases de données comme celles hébergées par les agences

spatiales, par Copernicus ou par l'IR Data Terra jouent un rôle central dans la diffusion, l'analyse et le traitement de ces données.

Un certain nombre d'actions ont été menées ces cinq dernières années, au cours desquelles un grand nombre d'outils transdisciplinaires ont été mis en œuvre. Ces actions ont illustré les avantages de l'utilisation d'une combinaison d'observations issues de plates-formes fixes et mobiles. Parmi ces activités on peut citer celles focalisées sur les interactions aérosols-nuages en Afrique de l'Ouest et en Afrique Australe, tels que les programmes DACCIIWA (Dynamics-Aerosol-Chemistry-Cloud Interactions in West Africa) CADDIIWA (Cloud-Atmospheric Dynamics-Dust Interactions in West Africa), et AEROCLO-SA (AErosol, RadiatiOn and CLOuds in southern Africa). Ces projets se sont concentrés sur les impacts des émissions naturelles et anthropiques sur la météorologie et le climat des régions d'Afrique en lien avec la santé humaine. Les campagnes de terrain font partie intégrante de ces programmes et combinent des plates-formes d'observation au sol et à bord d'avions, et notamment l'ATR-42 et le Falcon 20. Les objectifs de certains de ces projets étaient d'évaluer les effets de la poussière sur la dynamique atmosphérique dans cette région, et de contribuer à la préparation de plusieurs missions spatiales du CNES et de l'ESA. En l'occurrence, les instruments nationaux RALI et PMA contribuent régulièrement à l'étalonnage et la validation des produits 'vent', 'aérosol' et 'nuage' issus de l'observation spatiale (Aeolus, IASI) en région polaire (e.g. campagnes EPATAN et ThinICE), au latitude moyenne et en région tropicale (e.g. la campagne CADDIIWA), mais aussi la préparation des futures missions telles que EarthCare, AOS et Wivern contribuant aux études du bilan radiatif, des aérosols, des nuages et des vents intra-nuageux. La communauté française s'est également mobilisée sur l'étude des sources de méthane et dioxyde de carbone, d'origine naturelle et humaine, aux hautes latitudes dans le cadre de la campagne de mesures de gaz à effet de serre MAGIC depuis Kiruna, conjointement avec la campagne annuelle des ballons stratosphériques du CNES. Il s'agit également pour cette communauté de préparer les missions MicroCarb, Merlin et IASI-NG en contribuant à la validation des satellites de mesures de gaz à effet de serre en vol comme OCO-2, Sentinel 5P, GOSAT/GOSAT2 et IASI. Une série de campagnes de mer avec les plateformes fixes et mobiles s'est concentrée sur la structure 3D de la dynamique océanique à fine échelle avec un volet de validation des observations multi-satellites, et de l'impact sur la biomasse (ex. campagnes Adopt-a-Crossover pour SWOT, So-CHIC, AMAZOMIX...).

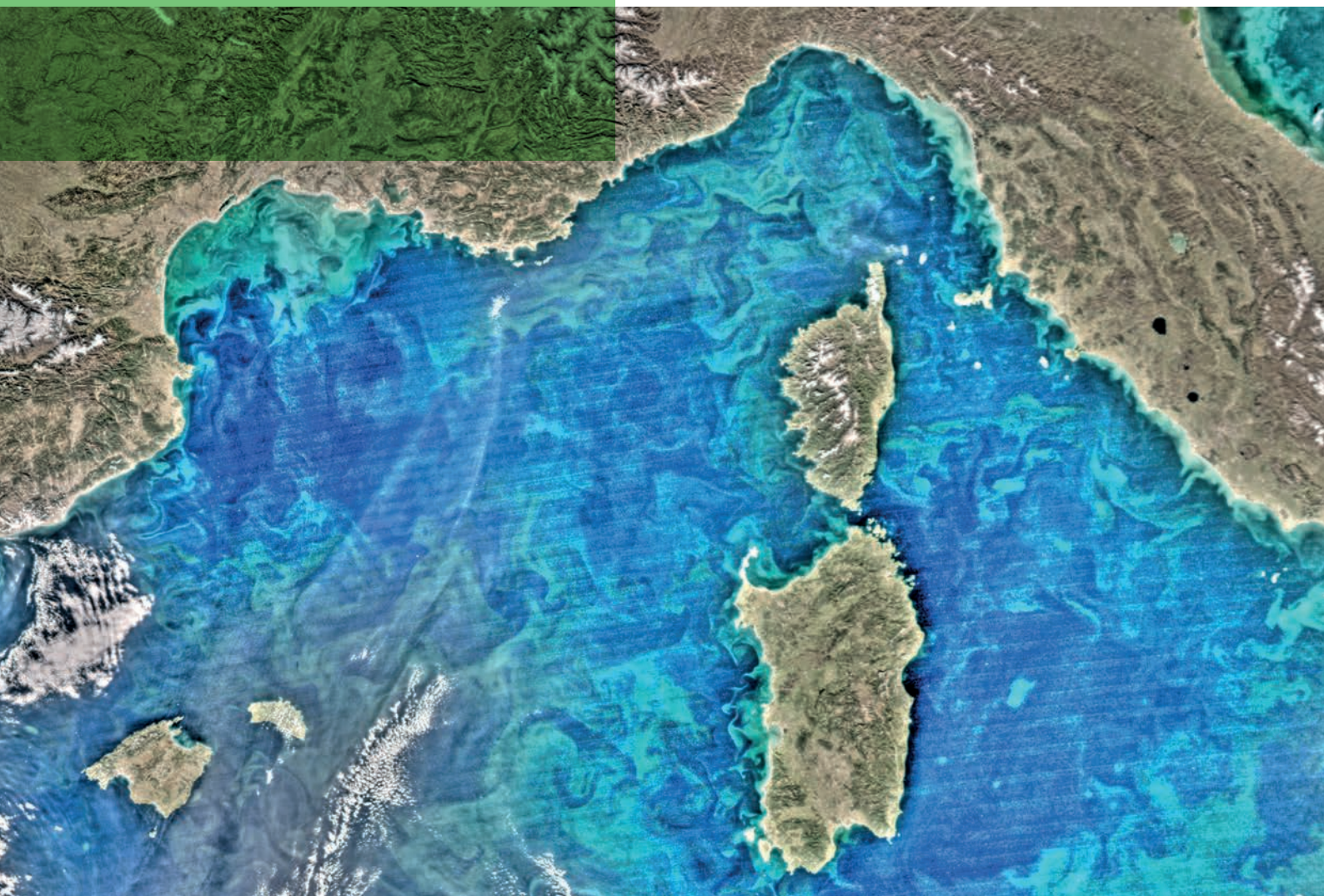
Au cours de l'été 2022, un effort national majeur combinant un ensemble important de mesures mobiles et aéroportées est celui du projet PANAME 2022. Un ensemble de 10 campagnes de terrain différentes a été réalisé avec l'objectif de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur les environnements urbains. Ces expériences combinent des plates-formes terrestres et mobiles, ainsi que des

Cliché satellitaire du quart nord-ouest de la Méditerranée occidentale, du 8 février 2022. En mer, sur un fond bleu, des tâches filamenteuses de couleur verte sont omniprésentes : il s'agit du phytoplancton. La plupart de l'année, leur présence est indétectable depuis l'espace, mais, sous certaines conditions environnementales favorables, le phytoplancton se développe, en multipliant sa concentration par 10 : c'est le printemps phytoplanctonique. Identifier la date de ce printemps, la suivre et en comprendre sa variabilité est critique pour comprendre comment l'océan et ses « habitants » microscopiques réagissent aux changements climatiques. Les satellites nous permettent d'identifier cette date grâce à des images comme celle-ci, à chaque instant et partout dans le monde.

© Fabrizio D'Ortenzio / LOV/ STAMAR

plates-formes nationales. Ces campagnes de terrain ont également mis en évidence le potentiel scientifique des outils labellisés INSU (sites instrumentés SIRTa et instrument national CESAM) pour participer à des campagnes d'observation intensives afin de répondre à des questions scientifiques spécifiques relevant de l'atmosphère.

D'autres programmes coordonnés par la France comprennent les programmes européens ERC EUREC4A et Sea2Cloud qui ont rassemblé une communauté internationale de l'atmosphère, de l'océanographie et de la biogéochimie ainsi que les équipes expertes en télédétection et en modélisation numérique de l'atmosphère, de l'océan et du couplage océan-atmosphère. La campagne EUREC4A a notamment développé des stratégies d'observation innovantes (e.g. mesures du profil de divergence de masse à mésoéchelle par dropsondes, télédétection lidar-radar à l'horizontale depuis l'ATR-42) qui ont permis de lever des verrous scientifiques majeurs dans la compréhension des rétroactions nuages-climat. Ces campagnes de terrain ont déployé des plateformes d'observation dans des conditions extrêmes et ont repoussé les limites des capacités d'observation.



Bilan bibliométrique 2017-2022

Les indicateurs basés sur la bibliométrie permettent de constater le dynamisme de la communauté océan-atmosphère. Une base de données extraite de Web Of Science a été constituée en appliquant un filtre sur les signatures des auteurs (nom du laboratoire OA de l'INSU, de l'UMR, nom de collègues travaillant sur des sujets OA mais dans des laboratoires hors OA). Sur la période janvier 2017 à décembre 2022, nous avons identifié environ 15 000 articles référencés, co-signés par 3 800 auteurs (*i.e.* articles très souvent avec des équipes étrangères).

L'évolution temporelle de la production scientifique du domaine océan-atmosphère est particulièrement intéressante à analyser. La production annuelle (nombre d'articles de rang A publiés) est en progression régulière. Elle est passée de 1 700 articles en 2017 à 2 250 en 2022 avec un rythme moyen de 6.4 % par an, ce qui correspond au même rythme que la production mondiale d'articles tous sujets confondus, qui a cru sur la même période à un rythme de 6.3 % par an. L'année 2021 est marquée par un pic remarquable avec plus de 2 600 publications. Ce pic qui est notable dès 2020 se retrouve sur l'ensemble des statistiques bibliométriques et a été attribué à l'impact de la crise sanitaire et des confinements de 2020 et 2021 sur la libération de temps pour analyser les données, finaliser des publications etc. Cet effet est cependant plus notable pour la communauté OA en France (+10 % en 2020 et +14 % en 2021) que pour la production mondiale tous sujets confondus (+9 % en 2020 et + 8 % en 2021) ou pour la production mondiale dans les domaines OA (+10 % en 2020 et +7 % en 2021). En supposant que les confinements aient été comparables d'un pays à l'autre, ces données semblent indiquer que la communauté nationale aurait su mieux tirer profit que la moyenne de ces situations d'arrêts forcés pour exploiter ses données. Il est possible que ce soit justement parce que ce besoin d'un temps de pause était plus prégnant. Cette analyse doit nous inviter à nous interroger sur l'exploitation de nos projets scientifiques et sur la nécessité d'organiser et de soutenir la valorisation de leurs données afin de minimiser à chaque instant le volume de données non publiées.

Environ 10 % des publications se fait dans 3 journaux (ACP, GRL, JGR), mais 50 % dans près de 60 revues, avec un impact en terme de citations également concentrés sur quelques revues (cf. figure 4). L'évolution au cours du temps des citations est difficile à quantifier car on constate nécessairement une progression avec le temps (articles publiés en 2018 plus cités qu'un article publié en 2019, etc.). Le taux de citation à deux ou trois ans est cependant élevé.

Les affiliations des auteurs qui apparaissent le plus sont des universités françaises et le CNRS. Des établissements étrangers apparaissent ensuite (intercalés avec d'autres établis-

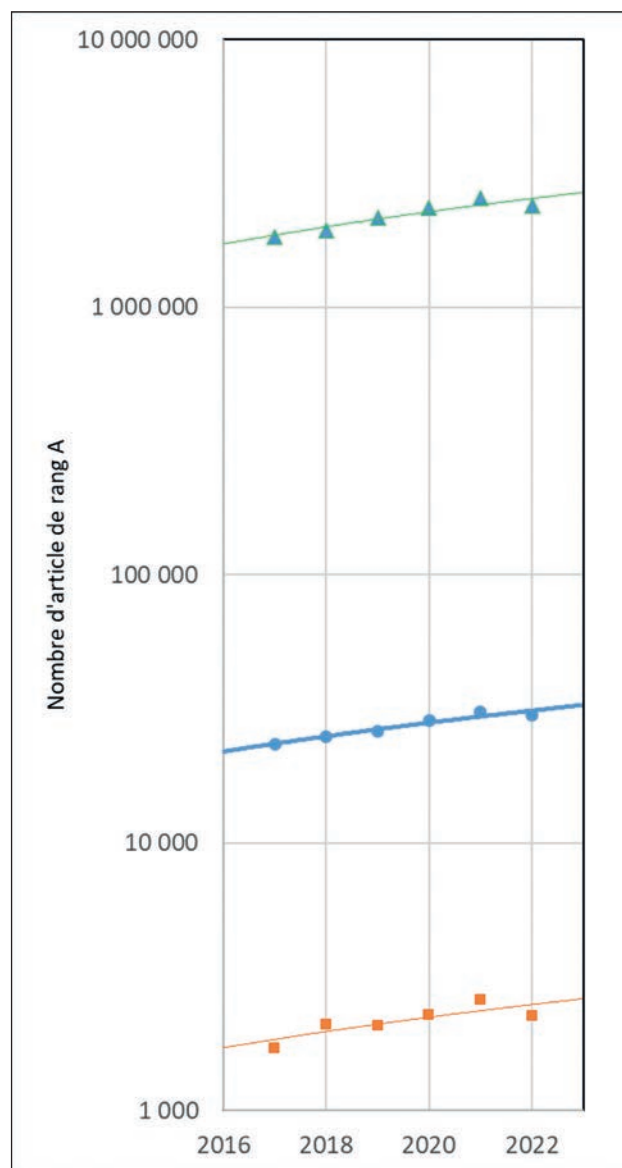


Figure 3: Production scientifique annuelle: nombre d'articles dans des journaux scientifiques de rang A. Marques oranges: communauté nationale Océan-atmosphère; marques bleues: production mondiale pour les catégories WoS « Océanographie, météorologie et Sciences atmosphérique »; marques vertes: production mondiale tous sujets confondus. Les traits pleins correspondent respectivement à une progression de 6.4 %, 5.6 % et 6.3 % par an.

(source Web of Science)

sements français) à partir de la 10^e position, en accord avec la production scientifique par pays (basé sur l'affiliation des auteurs, avec dans l'ordre décroissant, France, USA, Allemagne, UK, Chine, Italie, Canada, Espagne...).

Les sujets scientifiques couverts sont très variés comme en témoigne l'occurrence de mots clés dans les titres ou les ré-

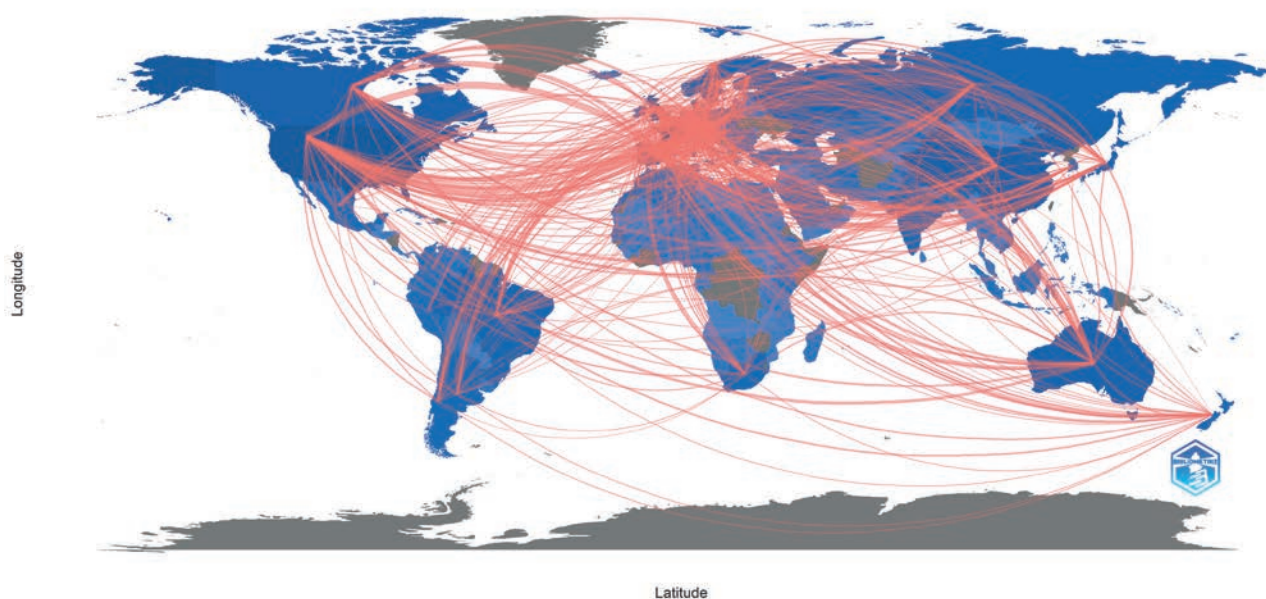


Figure 7 : Carte de collaborations par institutions de la communauté OA sur la période 2017-2022.

sumés des 15000 articles de la période. Les figures 5 et 6 donnent une représentation graphique de l'occurrence des monogrammes et bigrammes dans le titre de ces articles. Dans la figure 7, une représentation graphique du réseau et une carte des collaborations des institutions indiquées dans la signature des auteurs témoigne d'un important travail collaboratif avec des laboratoires étrangers dans le monde entier, le poids le plus important étant l'Amérique du nord et l'Europe.

RESSOURCES HUMAINES

Une analyse du bilan en termes de ressources humaines de la communauté océan-atmosphère a été conduite. Elle a porté sur les 19 unités CNRS-INSU rattachées au domaine OA et 4 unités CNRS-INSU rattachées à d'autres domaines

Inspection d'un spectromètre d'absorption à ultra-haute résolution Spirit à bord de l'avion ATR 42 de Safire, à l'aéroport de Kiruna en Suède, durant la campagne Magic 2021. L'ATR 42 est un avion du service des avions français instrumentés pour la recherche en environnement (Safire). Lors de la campagne Magic 2021, il est équipé d'instruments de télédétection dédiés à la mesure des gaz à effet de serre (GES). Complétées par des relevés au sol et en ballon, ces données sur les émissions des principaux GES (dioxyde de carbone et méthane) naturelles ou dues à l'homme, serviront aussi de point de départ aux futures missions spatiales de suivi des GES. Cette campagne de mesures des GES est pilotée par le CNRS et le Centre national d'études spatiales (Cnes).

© Thibault Vergoz / CNRS Image



(AA, SIC) mais dont une part importante des personnels, est soit rattachée à la section 19 du CoNRS, soit travaille sur des thématiques de la section (Figure 8). Le périmètre de la communauté OA considéré a évolué depuis le précédent exercice de prospective (création IGE; inclusion LEMAR; évolutions équipes OA dans des unités SIC/AA), limitant la possibilité d'une interprétation fine des tendances à long terme.

Les effectifs globaux permanents des unités considérées sont de 1098 chercheurs et enseignants-chercheurs (EC) et 826 personnels d'appui à la recherche (ITA) permanents (Fig. 8).

Après une diminution continue des chercheurs CNRS de la section 19 entre 2006 et 2016, la situation s'est légèrement améliorée et stabilisée depuis 2016 (Fig. 9). Le nombre de Directeur de Recherche (DR) augmente de façon quasi continue alors que le nombre de Chargé de Recherche (CR) diminue de façon continue également, traduisant la politique de promotion du CNRS. Le rapport DR/CR est de 1.15 en 2021.

Les effectifs d'EC ont augmenté jusqu'en 2019, mais montrent un léger recul en 2020 et 2021 (Fig. 10). Le nombre de professeurs (PR) a légèrement augmenté depuis la dernière prospective. Le nombre de Maîtres de Conférence (MCF) a augmenté légèrement entre la précédente prospective et 2019, et a sensiblement reculé en 2020 et 2021. Le rapport PR/MCF (0.52) atteste de la problématique de l'évolution de carrière des MCF, déjà soulignée lors de la dernière prospective. Pour les personnels CNAP (Conseil National des Astronomes et Physiciens), l'augmentation assez régulière des effectifs entre 2005 et 2016 a été suivie d'une période de stagnation des effectifs depuis la dernière prospective.

La population des départs à la retraite potentiels dans les 5 (61-66 ans) et 10 (56-60 ans) prochaines années représente 12% des effectifs chercheurs et EC à 5 ans; 27,5% à l'échéance de 10 ans. Ces départs à la retraite sont assez homogènes d'une communauté à l'autre, avec une proportion sensiblement plus forte dans la communauté océan (30%) et plus faible dans la communauté cryosphère (17%).

Dans les unités mixtes de recherche (UMR), les personnels CNRS représentent 35% des effectifs, les personnels des universités 33%, les personnels des autres organismes 32% (Fig. 11). Cette répartition est relativement stable par rapport à la dernière prospective malgré le changement de périmètre de l'étude.

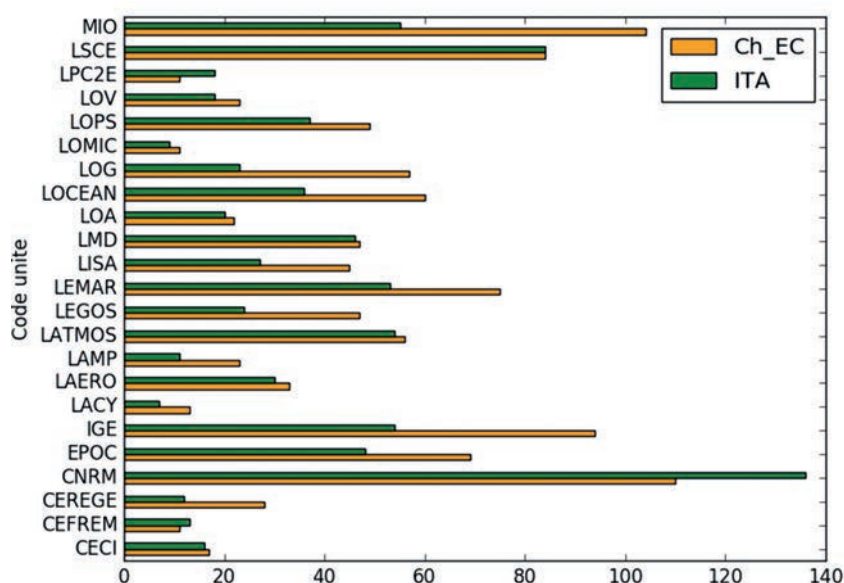


Figure 8 : Répartition de chercheurs et enseignants-chercheurs (OA) et ITA dans les laboratoires

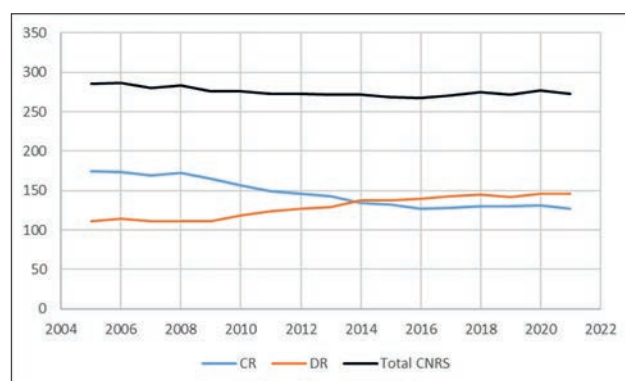


Figure 9 : Évolution des chercheurs CNRS de la section 19 de 2005 à 2021. Les données sont issues des bilans sociaux annuels du CNRS.

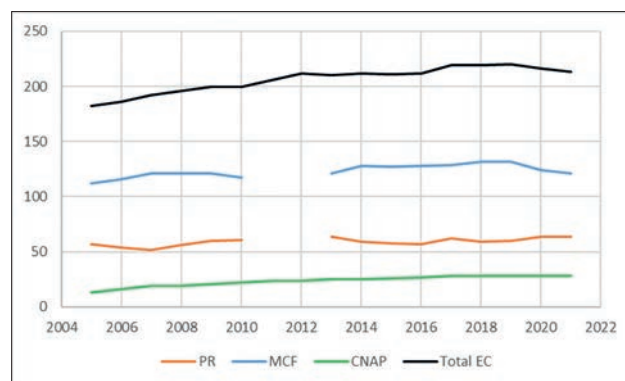


Figure 10 : Évolution des enseignants-chercheurs de la section 37 de 2005 à 2021. Les données sont issues des fiches démographiques des sections du CNU. Les personnes CNAP sont également indiquées (source bilan de la section CNAP SCOA). Les points absents correspondent à des données manquantes.

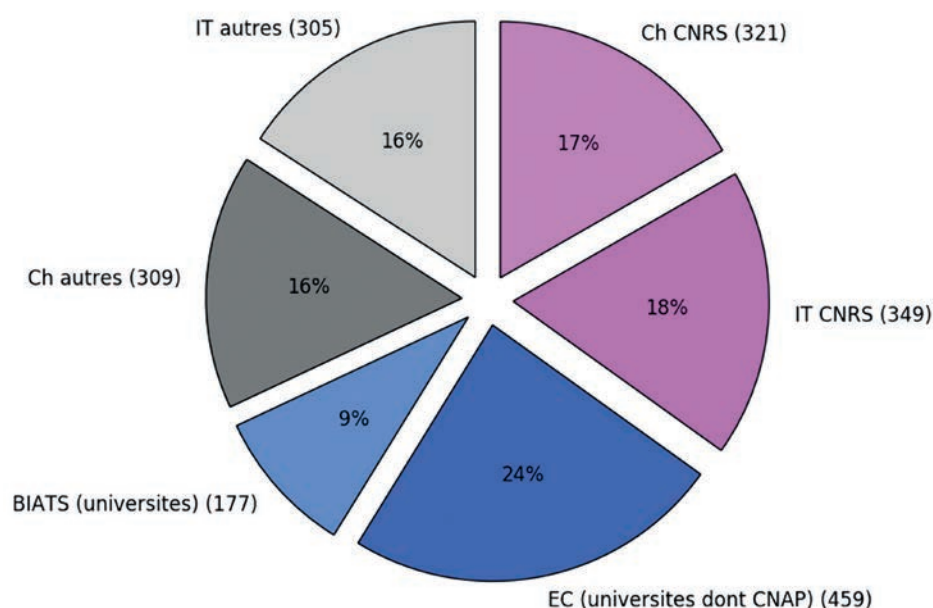


Figure 11 : Répartition par organisme d'appartenance des personnels permanents des unités incluses dans l'étude (CNRS, Universités et autres organismes).

Pour les chercheurs hors CNRS, l'IRD (~33%) et Météo-France (~31%) ont les poids les plus importants dans les effectifs. Cela reste vrai également pour les personnels permanents ITA mais avec une répartition différente (43% Météo-France, 19% IRD). Le poids grandissant de l'IRD dans les effectifs de la communauté observé lors de la dernière prospective se confirme ; tout comme ceux de l'IFREMER (en lien avec l'inclusion du LEMAR). Cette croissance est également observée pour le CEA (+7 personnels); mais le poids relatif du CEA décroît probablement par la modification du périmètre de l'étude.

En termes d'âge moyen, la moyenne des chercheurs et enseignants-chercheurs est de 49 ans, cette moyenne d'âge variant entre 48.7 ans (CNAP) et 50.1 ans (CNRS) pour les personnels CNAP, CNRS, EPIC, IRD et Universités, mais est nettement inférieure pour les autres personnels (44.3 ans). Pour les ITA, la moyenne d'âge est de 48.5 ans tout organisme confondu. Elle varie entre 46.6 ans (universités) et 50.4 ans (IRD).

Le vieillissement des ITA observé lors de la dernière prospective, se poursuit avec un nouveau déplacement du pic de la tranche d'âge de la tranche 45-49 vers la tranche 50-54 (Fig. 12). Ce vieillissement posera rapidement la question de la transmission de leur expertise technique qui est indispensable à la capacité des laboratoires à mener à bien leurs projets et éviter une perte de compétences. Pour les chercheurs et enseignants-chercheurs, une baisse plus marquée des effectifs des jeunes chercheurs et enseignants-chercheurs (30-39 ans), tous organismes confondus, ressort de l'analyse de la pyramide des âges. Considérant que le nombre de chercheurs et d'enseignants chercheurs est resté

stable depuis 2010, la désaffection de cette classe d'âge traduit un recul de l'âge de recrutement, donnée sur laquelle les jurys de recrutement devraient porter attention. L'effet de ce recrutement plus tardif sur la parité homme/femme n'a pas pu être analysé, les données sur la parité dans les effectifs de doctorants et post-doctorants en domaine OA étant difficilement compilables à ce jour.

Le ratio ITA/Ch_EC est de 0.75, stable depuis la dernière prospective (0.73), même avec un périmètre d'étude sensiblement différent. Mis à part le CNRM (cas particulier de Météo-France), le LPC2E (spatial et AA) et le LSCE (CEA) qui ont des ratios ITA/Ch_EC supérieurs ou égaux à un, l'ensemble des unités montre un ratio inférieur à un, voire bien en deçà pour certaines.

En ce qui concerne la répartition des activités de recherche des chercheurs et enseignants-chercheurs, elles restent centrées sur les domaines océan (43%) et atmosphère (29%) et attachées à l'étude des processus (36%) pour comprendre les phénomènes en jeu dans nos disciplines. Les approches expérimentales (39%) et numériques (28%) sont privilégiées ainsi que les données issues d'observations ou de mesures de terrain (72%) pour étudier le climat présent (63%). À noter qu'une part significative de la communauté (17.5%) mène des activités de recherche et développement. Les ITA permanents font partie majoritairement des BAP E (33%) et C (23%), les IR et IE y étant largement majoritaires (Figure 13). Pour les BAP A et B, les proportions de personnels AI et IE sont plus importantes. La BAP J est la BAP qui présente la plus forte proportion d'agents de catégorie C (T, AJT).

En termes de répartition dans les organismes, le CNRS présente le plus fort contingent de personnels ITA, suivi des

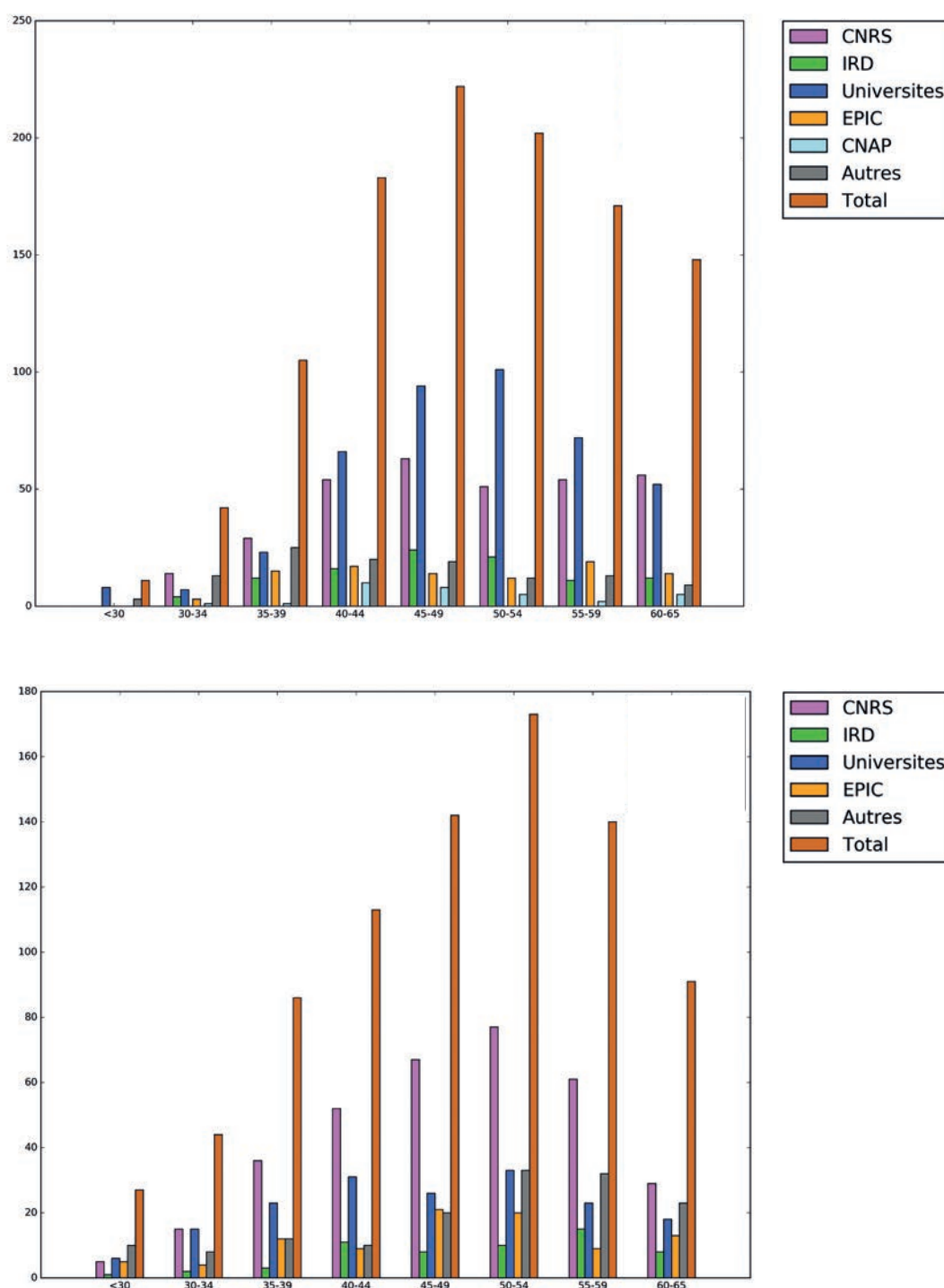


Figure 12 : Répartition par tranche d'âge et organisme des personnels permanents chercheurs et enseignants-chercheurs (haut) et ITA (bas)

autres organismes et des universités. Les personnels CNRS sont très majoritairement dans les corps AI, IE et IR avec respectivement 19%, 28% et 42% des 350 agents. Les universités présentent la plus forte proportion de personnels AJT qui ont quasiment disparu pour le CNRS et les autres organismes. Pour les autres organismes, les personnels sont majoritairement dans des corps d'ingénieurs ou de techniciens.

Près de 80 personnels ITA vont probablement partir à la retraite d'ici 5 ans (personnels âgés de 61-66 ans en 2022) avec 11 départs en BAP A, 8 en BAP B, 17 en BAP C, 25 en BAP E, 4 en BAP G et 14 en BAP J. Si on se projette à l'échelle de 10 ans, les départs à la retraite potentiels (tranche 56-66 ans) représenteront une forte diminution des effectifs notamment pour la BAP J (33% du personnel de la BAP) et la BAP E (26%) et les BAP A et C (20%). Compenser ce flux de dé-

part de personnels techniques CNRS, nécessitera une augmentation des recrutements annuels (qu'on estime à moins d'une dizaine aujourd'hui) de 50 % à 100 %. Un point de vigilance sur le taux de remplacement des agents est émis pour ne pas perdre de compétences ou faire des choix éclairés.

Le nombre total de personnels non permanents dans les unités du périmètre étudié est de 1136, correspondant à 594 doctorants et 575 personnels contractuels, soit une part conséquente de la communauté (38 %). Globalement, les personnels non permanents comportent autant de doctorants que de personnels contractuels, mais cette proportion varie beaucoup (d'un facteur 3 environ) selon les unités. Les personnels non permanents (principalement des post-doctorants) sont plus affectés à des activités de recherche qu'à

des activités techniques (321 contre 233, avec cependant une incertitude dans l'homogénéité des données collectées).

Les sources de financement des doctorants sont très variées. Les allocations de recherche doctorales ministérielles sont la source principale (presque 30 % des financements des doctorants). Les sources de financement internationales ressortent comme une autre source de financement importante montrant la bonne implantation des unités à cette échelle. Les régions, l'ANR, Météo-France, le secteur privé (Privé+CIFRE), et le CNES représentent également des acteurs importants dans le financement des doctorants (mentionnés 30 fois ou plus comme source de financement). À noter que les EUR (écoles universitaires de

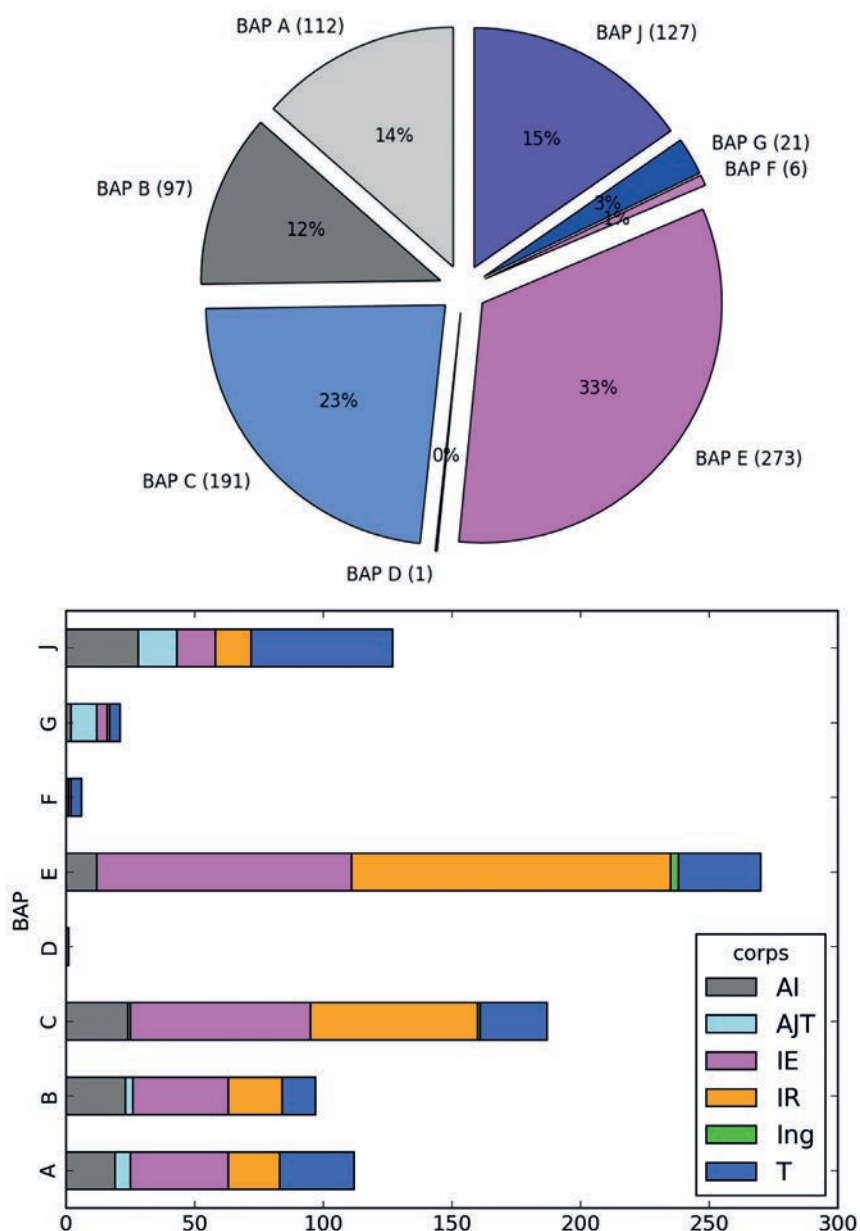


Figure 13: Répartition par BAP des personnels ITA permanents (en haut) et par BAP et corps (en bas).

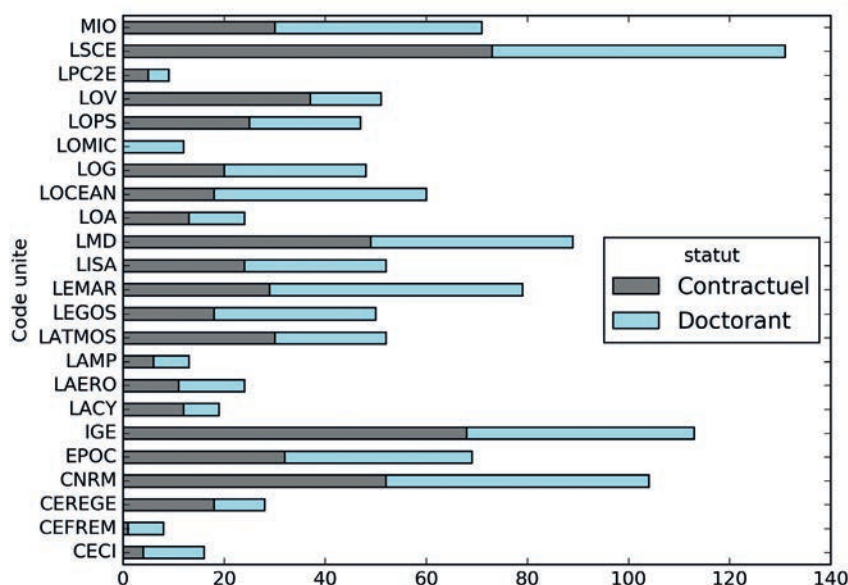


Figure 14 : Répartition des personnels non permanents par unité.

recherche) émergent comme un nouvel acteur de financement de contrats doctoraux.

Pour les personnels contractuels, la principale source de financement est l'Europe (~24%). Les activités spatiales sont fortement soutenues par les agences nationales et européennes (17%). L'ANR, les universités, les régions, le secteur privé, les collectivités territoriales contribuent également de manière significative au financement des personnels contractuels. Il est notable que les unités de recherche s'appuient sur leurs ressources propres pour recruter des personnels contractuels (6%). Les données de l'enquête ne permettent pas de déterminer si ces recrutements couvrent des besoins collectifs ou particuliers des unités. Ce point serait intéressant à évaluer. À noter que contrairement aux doctorants, les sources de financement de type international, hors Europe, sont moins marquées et que le nouveau programme MOPGA émerge parmi les sources de financement.

Plus de la moitié (53%) des personnels ITA contractuels mènent des activités de recherche, alors que 40% sont affectés à des fonctions d'appui à la recherche. La part des personnels contractuels et des doctorants ayant des activités expérimentales est plus faible que dans la population des personnels permanents. À noter que la quasi-totalité des personnels contractuels ayant des activités techniques sont de niveau ingénieur (AI, IE, IR), seuls 6% sont de niveau technicien. On pourrait attendre que le recours aux CDD sur projets vienne compenser au moins partiellement le déficit de personnels techniques dénoncé plus haut.

En ce qui concerne l'analyse de la parité homme/femme, Pour les chercheurs et EC, la proportion d'hommes et de femmes est respectivement de 64% (705) et 36% (393). Cette proportion varie d'un organisme à l'autre: elle passe de 60/40% au CNRS, à l'IRD et dans les EPIC à 75/25% pour les autres organismes. La répartition des âges montre que cet écart homme/femme est plus important sur les tranches d'âge supérieures à 50 ans). Pour les personnels ITA permanents, la proportion d'hommes et de femmes est respectivement de 58% (482) et 42% (342), un peu moins déséquilibrée que pour les chercheurs et EC. En revanche, cette proportion varie d'une BAP à l'autre avec la BAP J très féminine et les BAP E et C à large majorité masculine.

Concernant la répartition par âge, elle est assez homogène sur toutes les tranches d'âge.

Pour les personnels non permanents, la proportion d'hommes et de femmes pour les personnels contractuels (CDDs) est respectivement de 58% (332) et 42% (240). Pour les doctorants, la proportion est paritaire (296 doctorants, 298 doctorantes).

Le vieillissement des personnels chercheurs et enseignants-chercheurs et ITA permanents soulève le risque de pertes de compétences critiques pour notre communauté. À propos des recrutements de Chercheurs et Enseignant-Chercheur, le recul de l'âge de recrutement continue d'être une réalité et est visible dans la pyramide des âges. Elle mérite toute l'attention des membres des sections du CNRS et des commissions de recrutement.

Pour ce qui concerne l'appui à la recherche, il sera important de prendre en compte et anticiper la diminution importante des personnels de la BAP J dans les 10 prochaines années, mais également de BAP E, A et C.

L'augmentation continue de la part des personnels non permanents dans la communauté OA, qui s'élève à plus de 35% des personnels de la communauté, engendre, tout comme les départs à la retraite, le risque de pertes et suivi de compétences.

En termes de parité, la communauté OA n'atteint pas encore une stricte parité, à l'exception des doctorants. Si le vivier de candidats potentiels pour les recrutements est équilibré, la communauté doit résolument mettre en œuvre les moyens de maintenir cette parité à toutes les étapes des carrières. En ce qui concerne les promotions par exemple, cela peut passer par viser des ratios H/F de promus égaux à ceux du vivier promouvable plutôt qu'à ceux des candidatures.

Moyens financiers

PROGRAMMES NATIONAUX

Le programme national inter-organismes «Les Enveloppes Fluides et Environnement» (LEFE) a pour vocation de soutenir des recherches dans les domaines de l'océan, de l'atmosphère et de leurs interfaces. Il vise à favoriser l'émergence d'idées nouvelles, aux frontières de la connaissance dans un domaine spécifique ou entre disciplines ou entre milieux. Il vise aussi à mettre en œuvre la prospective du domaine. Ce programme est coordonné par le CNRS-INSU, et implique des organismes partenaires: l'ADEME, le CEA, le CNES, EDF, l'IFREMER, l'IRD, l'INRIA, le Ministère de la Transition Écologique, Météo-France, Mercator Océan et d'autres instituts du CNRS: l'Institut de chimie (INC) et l'Institut de physique (INP), qui forment le comité inter-organismes (CIO) et contribuent à hauteur d'environ 30 à 40 % au budget du programme en complément du financement apporté par le CNRS-INSU.

Le programme LEFE est ouvert à toute la communauté, les porteurs de projet comme les participants peuvent appartenir à tout type de laboratoire académique (CNRS, universités, autres organismes...). Le programme soutient des projets de recherche, et inclut le **fonctionnement** général du projet: consommables, petits équipements (<15 k€), et publications; les coûts d'accès officiels affichés pour l'utilisation de moyens nationaux; les coûts d'analyses; la valorisation scientifique de missions spatiales et de campagnes déjà réalisées (ballons, avions, navires océanographiques...); les frais de missions (congrès, réunions, etc.) et les frais de transport de matériel liés aux campagnes sur le terrain. Il peut participer au financement du **gros équipement** indispensable pour le projet (<50 k€/instrument). Enfin, le programme finance des **ateliers** dans le cadre de l'animation de chaque Conseil Scientifique (CS) d'action. Le programme ne soutient pas les demandes de financements de Ressources Humaines (doctorants, CDD, post-docs, stages), ni les colloques.

Le programme LEFE s'organise autour de 5 actions scientifiques:

- CHAT (Chimie atmosphérique)
- IMAGO (Interactions Multiples dans l'Atmosphère, la Glace et l'Océan)
- CYBER (Cycles biogéochimiques, environnement et ressources)
- MANU (Méthodes mathématiques et numériques)
- GMMC (Groupement Mission Mercator-Coriolis)

Il est possible de soumettre des projets impliquant plusieurs actions. Une procédure spécifique est mise en place pour les projets qui seraient communs à EC2CO et LEFE.

Les projets LEFE appartiennent à 3 catégories, définies par l'INSU: projets à risque ou de rupture (5 à 15 k€/an, sur un ou deux ans), projets en lien avec les IR/TGIR (10 à 20 k€/an sur un ou deux ans) et projets collaboratifs (10 à 30 k€/an sur deux à trois ans). Un dépassement des montants indiqués n'est possible que pour les «Projets d'envergure» qui doivent être annoncés par une lettre d'intention envoyée au printemps de chaque année. Le programme soutient un à deux de ces projets d'envergure pour un montant entre 90 et 150 k€.

En moyenne, sur les appels à projet 2022 et 2023, le financement annuel attribué aux projets à risque ou de rupture est de 17 k€, ceux adossés aux IR-TGIR de 18 k€, et les projets collaboratifs de 33 k€. Globalement, la moyenne en pluri-annuel d'un projet LEFE accepté est de 25 k€. Le taux de succès est élevé: il varie ces 5 dernières années entre 60 et 70%. Les raisons du rejet sont généralement liées à un défaut de lecture de l'Appel à Proposition (AAP) ou des lacunes portant sur l'organisation, le contenu et la méthodologie des projets.

Le programme LEFE fonctionne via un CS et un Comité Inter-Organismes, ainsi que des CS d'action, qui évaluent les projets reçus en faisant appel à des rapporteurs internes et externes. L'évaluation est faite à l'automne de chaque année, le CIO entérine les décisions prises en décembre et les notifications aux porteurs sont faites en janvier de l'année suivante. Les CS d'action comportent entre 10 et 15 membres. Soixante et un membres composent les CS d'action, avec 43% de femmes, un taux de renouvellement annuel de 6% en 2022. La diversité thématique des membres des CS se reflète dans la diversité des laboratoires d'origine des membres qui viennent de 39 laboratoires (dont Belgique) et différents organismes et universités; les laboratoires plus représentés étant le LOPS (5); le LEGOS (4), le LSCE (4), le CNRM (4), l'IGE (3), EPOC (3), le LOCEAN (3), et le LMD (3).

Une des spécificités des CS d'action de LEFE est l'**organisation d'animations scientifiques** pour l'ensemble de la communauté. Un budget de 50 k€/an est réservé pour financer ou cofinancer ces animations. En plus des ateliers organisés ou co-organisés sur des sujets spécifiques, les CS d'actions organisent régulièrement des colloques nationaux (CHAT - mai 2022; IMAGO - novembre 2022; GMMC et MANU - mai et juin 2023).

Une des caractéristiques remarquables de la dernière période est la **baisse du nombre de projets soumis à LEFE**: suite à l'AAP 2023 diffusé en juillet 2022, seulement 44 projets ont été soumis. Le montant demandé sur 3 ans est de

1450 k€, et sur 2023 de 763 k€. Il s'agit là d'une baisse assez forte, qui correspond à une tendance de fond depuis plusieurs années (Figure 15). Les financements des organismes partenaires sont également indiqués (Figure 16), tout comme le montant total LEFE géré par le CNRS : montant bonifié par la part variable des conventions spécifiques impliquant le Ministère de la Transition Écologique, l'INRIA, Mercator Océans, la Fondation Air Liquide et l'ADEME, dont la somme est comprise entre 70 et 270 k€ selon les années. On représente également le montant total géré au CNRS (Figure 16), correspondant à la somme de la contribution du CNRS et des organismes partenaires. La baisse constatée en 2023 pour la dotation CNRS est une réponse à la baisse des demandes et n'est pas appelée à être pérennisée en 2024.

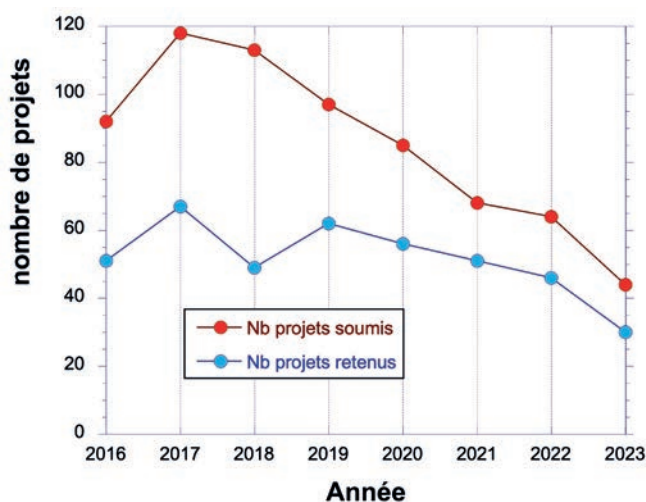
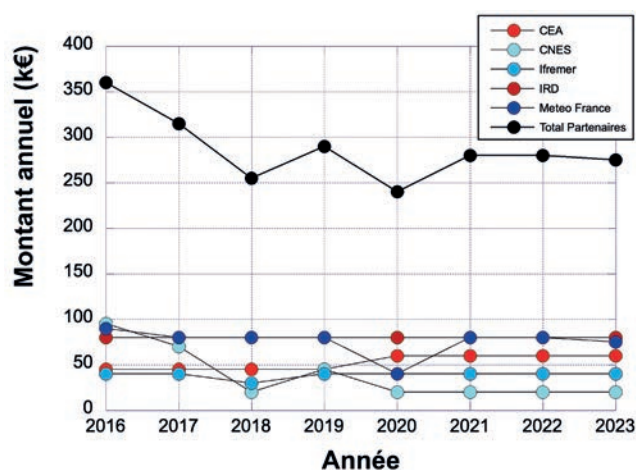


Figure 15 : évolution du nombre de projets soumis à LEFE, et retenus, entre 2016 et 2023.



La baisse constatée pour l'AAP 2023 par rapport à l'AAP 2022 impacte surtout les CS CYBER et IMAGO, qui voient leur nombre de projets soumis divisé par deux, et les montants des demandes également divisés par deux, l'action MANU montrant également une baisse depuis environ 2 ans, pour des raisons sans doute plus ponctuelles (PPR Océans et Climat : projet MEDIATION ; lancements de l'Institut des Mathématiques pour la Planète Terre, et du GDR Défis théoriques pour les sciences du climat).

Les baisses de soumission interrogent sur le rôle et la spécificité du programme LEFE dans le panorama des opportunités de financement existant et se développant, notamment en regard des PPR et PEPR. Cette tendance à la baisse n'est cependant pas spécifique à LEFE. On peut tenter de la relier à une surcharge de travail des collègues mais aussi à la multiplication des appels à projets, (IDEX, PPR-PEPR, CPER, MITI, AO des Universités, Instituts, etc), ainsi qu'à l'augmentation des taux de réussite à l'ANR et dans une moindre mesure à la dotation d'accueil des nouveaux entrants au CNRS-INSU. La baisse observée précède l'impératif d'inscription des projets financés par les programmes nationaux du CNRS-INSU dans un des trois types de projets (projets à risque ou de rupture ; projets en lien avec l'exploitation des données et services des IT/TGIR ou SNO ; projets collaboratifs) ; ce dernier ne peut donc être invoqué comme facteur dominant. Enfin, des raisons conjoncturelles, liées aux annulations et réductions des campagnes en mer programmées par la FOF en 2022 sont également invoquées.

Dans tous les cas, cette baisse rend compte du fait que les communautés ont su saisir la diversité d'opportunités offertes pour développer leurs projets de recherches, au détriment (parfois) de l'articulation nationale qu'offre LEFE, et plus généralement les programmes nationaux.

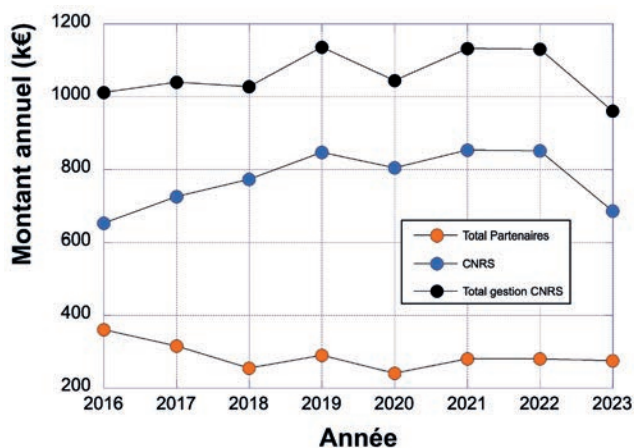


Figure 16 : évolution en k€ du soutien des organismes partenaires hors CNRS au programme LEFE (gauche) ; évolution en k€ du soutien total des partenaires, du soutien du CNRS (INSU+autres instituts) et du total géré au CNRS (droite).

QUEL RÔLE POUR LEFE : ANALYSE DU QUESTIONNAIRE ENVOYÉ À LA COMMUNAUTÉ FIN 2022

Le questionnaire envoyé à la communauté LEFE via les DU des différents laboratoires OA (questionnaire initialement CYBER mais ensuite envoyé à tous les labos OA) a recueilli 187 réponses. Celles-ci montrent un vrai attachement au programme LEFE, du panel ayant répondu (environ 10 % de la communauté OA), et esquissent des suggestions pour l'évolution du programme LEFE.

1. Pour ceux qui ont déjà déposé ou participé à un projet LEFE : ce programme vous a-t-il aidé, par rapport à d'autres AAP ? Oui 82 %
2. Cet AAP vous semble-t-il important, par rapport à d'autres AAP (ANR...) pour la communauté ? Oui 97 %
3. Un projet LEFE vous a-t-il permis de déposer ensuite un projet de plus grande envergure (ANR, Europe...) ? Oui 51 %, Non 49 %
4. Vous semble-t-il important de maintenir l'AAP LEFE ? Oui 98 %
5. Faudrait-il faire évoluer les thématiques abordées par l'AAP LEFE ? Oui 38 % Non 62 %
6. Pensez-vous utile pour la communauté que le programme LEFE soutienne des ateliers thématiques ? Oui 80 %
7. Seriez-vous intéressé par la possibilité de financer des gratifications de stages de M2 ? Oui 89 %
8. Envisagez-vous de déposer un projet dans les prochaines années ? Oui 81 %

Le Programme National de Télédétection Spatiale, PNTS, a pour mission de soutenir des actions visant à encourager et à favoriser les développements méthodologiques relatifs à l'observation de la Terre par télédétection spatiale (projets de recherche, organisation de colloques, labellisation de sujets de thèses...). Une des originalités du programme PNTS repose sur sa multidisciplinarité car le programme couvre les domaines Océan, Atmosphère, Surfaces et Interfaces Continentales et Terre Solide. Le programme PNTS est animé par le domaine OA de l'INSU et reçoit le soutien de différents organismes publics (INSU, CNES, IRD, IGN, Météo-France) qui suivent régulièrement les activités du programme via un Comité Inter-Organismes.

Le fonctionnement du PNTS est assuré par un comité scientifique composé de 12 membres issus des différents do-

maines couverts par le PNTS et par un bureau issu de ce comité scientifique. Les modalités de l'appel à projets PNTS et les dates de soumissions et d'évaluation sont identiques à celles du programme LEFE. Sur les 5 dernières années, le nombre de projets reçus est en moyenne de 12 par an, le taux de réussite est de 79 % en termes de projets et de 37 % en termes de financements. L'activité du PNTS inclut également une forte composante d'animation de la communauté scientifique multi-domaines autour du spatial. Un des temps forts du programme est l'organisation annuelle de journées thématiques sur des thèmes volontairement transverses (par ex. Traitement massif des données en 2022 et Télédétection spatiale aux interfaces en 2023).

EUROPE ET INTERNATIONAL

En ce qui concerne, la participation à des projets collaboratifs, la mobilisation de la communauté OA sur les programmes-cadres européens pour la recherche et l'innovation – Horizon 2020 de 2014 à 2020, puis Horizon Europe depuis 2021 – porte ses fruits depuis plusieurs années, avec un engagement constant qui bénéficie à une majorité des unités OA. Sous Horizon 2020, les équipes océan-atmosphère ont déposé plus de 240 projets collaboratifs via la CNRS, dont 70 coordinations. Leur taux de succès, bien supérieur à la moyenne européenne, a été de 29.8 % (contre 15.2 % au niveau français et 11.9 % au niveau européen). Ce bilan n'inclut pas les projets déposés par les universités ou autres organismes. Les programmes H2020 dans lesquels on compte le plus de participations OA sont les Actions Marie Skłodowska-Curie (AMSC), le défi Climat (SC5), le programme Espace, le programme Infrastructures de recherche et le défi Bioéconomie (SC2).

Parmi ces projets, la communauté OA a coordonné 7 projets collaboratifs d'envergure au sein d'unités CNRS, principalement constitués de projets d'infrastructures de recherche liées à l'IR ACTRIS, et des Actions de Recherche et d'Innovation (RIA) dans le défi Climat.

Le lancement d'Horizon Europe en 2021 a fait émerger de nouveaux enjeux, avec un accent renouvelé sur l'innovation et l'émergence d'initiatives tournées vers l'engagement de la société civile et des citoyens. À ce titre, les Missions visent à mieux articuler les réponses aux grandes problématiques sociétales en générant des solutions dans une logique de co-construction avec les acteurs de la société. Ce sont des espaces intéressants à investir pour valoriser les recherches au sein des unités OA, en particulier les Missions « Adaptation au Changement climatique et transformations sociétales » et « Régénérer notre océan et nos eaux ». Elles doivent notamment permettre de faciliter le lien entre acteurs académiques et collectivités territoriales, et développer un volet modélisation, par exemple via le Jumeau numérique de l'océan. Les Missions ont d'ores et déjà suscité plusieurs propositions de la part des équipes OA, dont les résultats doivent émerger dans les prochains mois.

Au sein des défis globaux ou clusters (pilier II d'Horizon Europe), la communauté OA est bien représentée dans le cluster 5 « Climat, Énergie, Mobilité », avec un nombre important de projets déposés sur la première période 2021-22. La présence d'équipes OA pourrait être renforcée dans le cluster 6 « Alimentation, Bioéconomie, Ressources naturelles, Agriculture et Environnement » qui comprend des appels sur les océans, les environnements côtiers et polaires, et dans le cluster 4 « Industrie, Numérique et Espace » qui comprend des appels sur le développement d'applications spatiales d'observation de la Terre.

Les appels d'offres de l'European Research Council (ERC) ont profondément changé la structure du financement de nos projets en favorisant l'émergence d'une forte individualisation du support financier. On dénombre une trentaine de lauréats ERC dans les unités OA depuis la création du programme en 2007 (panel ERC PE10: Earth System Science). La participation des unités OA à l'ERC est un peu en deçà si on la compare aux autres domaines INSU ; les lauréats ERC OA représentent environ 18 % des lauréats INSU alors que le domaine représente plus de 25 % des SdU.

Les appels d'offre ERC Synergy lancés en 2018 (après deux essais pilote en 2012 et 2013) semblent mieux correspondre à nos communautés et leur besoin. Il faut, en effet, noter la très bonne participation et le bon taux de succès des équipes OA aux appels ERC Synergy, qui financent des groupes de 2 à 4 scientifiques et qui sont particulièrement compétitifs. Ils constituent aujourd'hui les appels « blancs » les mieux financés au niveau européen (10 à 14 millions d'euros sur 6 ans).

Ce constat mérite cependant d'être mitigé. Le présent bilan rend compte en effet de financements ERC (Starting grant, consolidator ou advanced) - tels que EUREC4A ou REFINE - qui bien que positionné sur un porteur ou une porteuse unique ont permis de fédérer toute une communauté et de mener des opérations de recherche collectives d'envergures.

La coopération internationale fait partie intégrante des travaux menés au sein de la communauté océan-atmosphère.

Le domaine OA compte parmi ses unités deux Laboratoires de Recherche Internationaux (IRL, anciennement appelés UMI) : TAKUVIK avec l'Université Laval au Québec qui développe des recherches sur les écosystèmes et géosystèmes arctiques, et IFAECI, Institut Franco-Argentin d'Études sur le Climat et ses Impacts situé à l'Université de Buenos Aires en Argentine.

Le domaine OA se saisit largement des outils CNRS pour les collaborations et mobilités internationales (Actions émergentes, Projets et Réseaux de recherche internationaux, etc.). Le budget annuel INSU dédié à des actions de

coopération internationale OA représente en moyenne environ 125 000 euros (sur 639 000 euros pour l'ensemble des domaines INSU). Des projets structurants pour la communauté sont en coopération avec la Chine, le Chili et l'Afrique australe notamment.

De plus, 10 unités du domaine océan-atmosphère, 5 Observatoires des Sciences de l'Univers et une fédération comptent l'IRD parmi leur tutelle marquant leur orientation en faveur de la coopération internationale au Sud et rendant leurs personnels éligibles à l'accueil en expatriation.

Défis scientifiques en océan- atmosphère :

Comprendre et prévoir le système climatique, en transition d'un état naturel à intégralement anthropisé

Le bilan scientifique des dernières années de recherche de notre communauté esquisse les principaux enjeux scientifiques à venir. Cette prospective s'est tenue de manière concomitante avec la clôture du sixième cycle de rédaction du rapport du GIEC, exercice pour lequel la contribution scientifique française a été particulièrement décisive. Ainsi, dans le domaine OA, cette participation massive dans le 1^{er} groupe de travail s'exprime en termes d'implication directe dans la rédaction (12 *lead authors*), et indirectement dans l'origine géographique des travaux cités (plaçant la France

au premier rang avec 7730 articles cités), quatre organismes et établissements français figurant dans les 20 premiers organismes cités. Les événements météorologiques en métropole de l'été 2022 ont marqué cette réflexion, événements qualifiés dans le grand public de points de bascule du système climatique. À la croisée de ces événements sensibles, l'importance fondamentale de la compréhension du système climatique désormais sous l'influence indubitable de l'empreinte anthropique, et des impacts de ces changements sur les sociétés humaines, nous est apparue comme

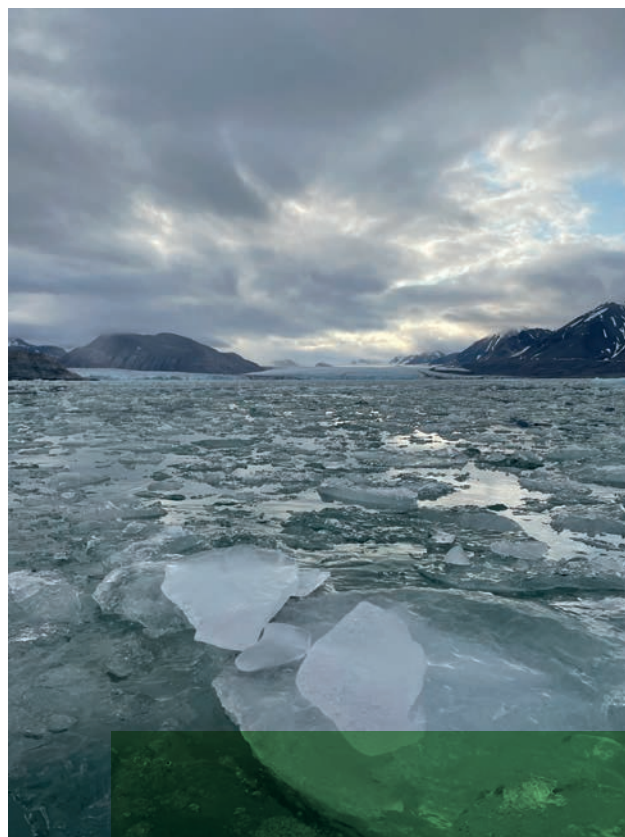
l'élément structurant des sciences de notre communauté. Quels sont les processus du système climatique méconnus et pour lesquels les mécanismes, rétroactions possibles doivent être mieux décrits et quantifiés ? Quelles sont les incertitudes associées aux changements environnementaux et en particulier ceux d'origine anthropique ? Quelles sont les interactions entre les différents compartiments du système climatique, qu'ils soient abiotiques ou biotiques ? Autour de ces questions, la prospective a proposé d'organiser les enjeux scientifiques autour de six défis, complétés par une déclinaison géographique au sein d'aires prioritaires.

Le premier défi porte naturellement sur l'identification des variabilités, tendances et points de bascule du système climatique. Le deuxième défi s'intéresse spécifiquement aux événements extrêmes, dont les enjeux sociétaux ne cessent de croître, et inclut également des « cygnes noirs » naturels pour lesquels la connaissance reste très parcellaire et qui peuvent agir en résonance de l'impact de l'homme. Comprendre les mécanismes de convection atmosphérique à toutes échelles de temps, par une approche multi facettes constitue le troisième défi. Deux défis s'inscrivent dans la continuité des piliers identifiés lors de la précédente prospective et concernent les couplages et interactions d'échelle, ainsi que le rôle de la diversité du vivant dans les grands cycles élémentaires. Enfin, l'impact avéré de l'homme, sur tous les milieux, fait l'objet d'un dernier défi. Pour chacun de ces défis, les enjeux sociétaux sont prégnants, sans être toutefois l'unique moteur de leur définition, les fronts de science de nos connaissances nécessitant évidemment de se nourrir d'un corpus fondamental.

Si le prisme du changement climatique et de l'anthropisation des environnements fournit une grille d'analyse pertinente pour le continuum *data-to-decision* nécessaire pour guider les politiques publiques, le champ de nos recherches doit préserver des actions de renforcement des connaissances des enveloppes fluides et des interactions entre elles, par des recherches fondamentales. Parmi les connaissances fondamentales qu'il semble important de préserver, figurent la mécanique des fluides géophysiques, au cœur des modèles climatiques et météorologiques. Celle-ci est particulièrement critique au regard d'une homogénéité parfois considérée comme un biais des modèles climatiques. Le maintien d'une expertise sur ces enjeux à la base de la représentation de nos systèmes naturels est donc un premier point de vigilance qui transcende les différents défis.

Un second axe pour nos communautés OA porte sur notre appropriation et implication sur les connaissances fondamentales liées à la biodiversité, à l'interface avec les enjeux portés par les instituts et organismes dépassant le domaine OA (INEE, INSB, IFREMER, IRD, MNHN, Universités). Les apports d'inventaires du vivant, s'ils s'ancrent dans une tradition scientifique séculaire, restent néanmoins un pilier fondamental à préserver et promouvoir. La communauté océan-atmosphère doit poursuivre son effort d'articulation

entre son expertise de domaine sur les changements biogéochimiques et physiques de l'environnement avec l'essor de nouvelles méthodologies quantitatives (biométrie, génomique), complétées par des approches statistiques avancées (machine learning), et bioinformatique pour compléter la vision offerte par l'analyse taxonomique classique.



Photographie du Kongsfjorden le 25/08/2021, montrant une mer recouverte d'icebergs puis au dernier plan les glaciers tidaux Kongsvegen et Kronebreen sous un ciel couvert. Avec une orientation vers l'ouest, cette vidéo montre l'embouchure du Kongsfjorden, un fjord dans l'archipel du Svalbard étudié pour être une sentinelle du réchauffement climatique en Arctique.

Notre équipe étudie l'influence de la fonte des glaciers et des apports de sédiment associés sur les écosystèmes benthiques. Plus particulièrement, nous étudions les foraminifères, des organismes unicellulaires vivant au fond des océans sur et dans le sédiment. Leur distribution horizontale et verticale sur/dans le sédiment dépend des conditions environnementales proches (géochimie, apport de nourriture). Ainsi ils sont de bons indicateurs de variations dans un milieu en transition comme le Kongsfjord.

© Corentin Guilhermic /LPG/ CNRS images

Défi « Variabilités, tendance et points de bascule du système climatique »

LES ENJEUX

Il est désormais bien établi que le climat se réchauffe sous l'effet des activités humaines et que ce réchauffement se poursuivra dans le futur. Toutefois, de nombreuses incertitudes demeurent quant à la rapidité et l'ampleur que prendra ce réchauffement au cours des prochaines décennies, et concernant les conséquences du changement climatique, de l'échelle globale à l'échelle régionale. Comment interagira-t-il avec les modes de variabilité interne du système climatique ? Induira-t-il des 'bascules' ou changements irréversibles de certaines variables climatiques susceptibles d'affecter l'habitabilité de certaines régions de la planète ? En réduisant ces incertitudes, la recherche permettra de mieux guider les mesures d'adaptation de notre société au changement climatique.

Pour cela, des progrès sont nécessaires à la fois dans l'observation (pour mieux documenter la variabilité du système climatique aux différentes échelles de temps et mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans la dynamique du climat), la modélisation (pour réduire les biais et les incertitudes des modèles climatiques et rendre leurs simulations plus crédibles) et notre compréhension physique du fonctionnement du système climatique (pour évaluer notre confiance dans les résultats et les projections des modèles, quantifier et attribuer la part des activités humaines dans les changements observés, et expliquer les « surprises climatiques » qui ne manqueront pas de survenir au cours des prochaines décennies).

La compréhension de la dynamique du système climatique repose sur le diptyque indissociable d'observations et de modélisations multi-échelles. L'augmentation massive des observations au cours des dernières décennies, et l'évolution des modèles climatiques, ont joué un rôle déterminant dans la compréhension des évolutions climatiques passées, et dans la prévision des changements climatiques futurs. Les modèles prédisent la majorité des tendances à grande échelle observées aujourd'hui, ainsi que les phénomènes agissant à l'échelle continentale. Toutefois, les modèles climatiques représentent moins bien la variabilité des précipitations et des régimes de température de surface de la mer, ainsi que certains événements extrêmes, et peinent à évaluer le risque de surprises potentielles (cf Défi « événements extrêmes »). Le développement des modèles climatiques reste donc une nécessité si l'on veut augmenter notre confiance dans les projections climatiques et mieux anticiper les éventuels points de bascule du système climatique planétaire (définis comme les seuils critiques qui, lorsqu'ils sont dépassés, peuvent entraîner un changement significatif de l'état du système climatique).

Il reste des lacunes dans les connaissances scientifiques sur la manière de représenter dans les modèles de simulation du climat les processus physiques océaniques, atmosphériques et terrestres et leurs interactions à diverses échelles. Ces lacunes se traduisent par des biais persistants dans le climat simulé, et par certains manques dans les observations à très long terme du système climatique. Par exemple, la plupart des modèles climatiques ne simulent pas très bien la structure spatiale des températures de surface de la mer, elle-même liée aux biais atmosphériques ; les températures estivales simulées sont trop chaudes sur les continents ; et la structure spatiale des précipitations tropicales reste mal simulée. Des imperfections sont également constatées dans la représentation des principaux modes de variabilité tels que l'oscillation El-Niño/Sud (ENSO) ou le dipôle de l'Océan Indien (IOD), qui implique des processus de couplage entre l'océan et l'atmosphère qui ne sont pas entièrement compris. Les modèles montrent également des difficultés persistantes à représenter les grands changements des climats passés, comme l'ampleur du réchauffement hivernal depuis le dernier maximum glaciaire ou l'ampleur du déplacement vers le nord de la mousson africaine qui a conduit à un Sahara végétalisé il y a 6000 ans ; et sur des échelles de temps plus récentes au cours du 20ème siècle à simuler la diversité des événements de l'ENSO et dans une moindre mesure de l'IOD.

Le devenir des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique est un enjeu majeur pour la montée future du niveau de la mer. La génération actuelle des modèles de calottes polaires n'est pas capable de reproduire la perte de masse observée des calottes, et leur capacité limitée à représenter la dynamique des calottes constitue la principale cause d'incertitude des projections du niveau de la mer. De plus, les facteurs qui modulent régionalement et temporellement le niveau de la mer (notamment le rôle des courants océaniques) restent mal connus.

Parmi les enjeux liés aux tendances du changement global, subsiste également notre capacité à documenter les variabilités et tendances des constituants atmosphériques (voir aussi Défi « Anthropisation et pollutions »). Les interactions entre qualité de l'air, chimie, et climat, demandent la prise en compte simultanée des espèces à courte durée de vie (Short-Lived Climate Forcers ou SLCFs en anglais) et des gaz à effet de serre (GES) à plus longue durée de vie, principalement le dioxyde de carbone (forme oxydée ultime des COVs), le méthane et le protoxyde d'azote. Les SLCFs, espèces d'intérêt pour les interactions entre la chimie atmosphérique et le climat, incluent les aérosols et les gaz réactifs (le méthane, l'ozone, des composés halogénés, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone, les composés organiques

volatils non-méthaniques, le dioxyde de soufre et l'ammoniac). Les enjeux des prochaines années portent sur la compréhension des tendances observées des GES et SLCFs afin d'en permettre la modélisation et de développer des solutions d'atténuation et d'adaptation procurant de co-bénéfices pour la qualité de l'air et le climat (cf encart solution).

Le compartiment océan joue un rôle prépondérant dans la régulation du climat. Par le biais des échanges à l'interface air-mer, l'océan absorbe, transporte et stocke environ un quart du CO₂ généré par les activités humaines et la grande majorité du surplus de chaleur associé (env. 90%). Il influence l'intensité des cycles climatiques, y compris le cycle hydrologique, ainsi que la genèse et le développement des événements météorologiques et marins extrêmes. Si la capacité de l'océan à stocker la chaleur et le carbone a ralenti le réchauffement climatique, les propriétés de l'océan s'en trouvent modifiées ce qui engendre des rétroactions sur l'atmosphère, la cryosphère et les continents ainsi que des incidences de plus en plus importantes sur la biosphère marine. L'océan perd de l'oxygène, en partie en raison de la moindre solubilité de ce gaz à des températures plus élevées, et s'acidifie en réponse à la dissolution accrue du CO₂. Pour mieux appréhender la trajectoire du système climatique aux échelles décennales et centennales, il importe donc de mieux caractériser la variabilité interne de l'océan et les échanges de carbone entre l'océan et l'atmosphère et le devenir (séquestration versus minéralisation) de ce carbone dans l'océan profond.

La dynamique de la circulation océanique redistribue les traceurs physiques, biogéochimiques et anthropiques (pollution, plastiques...), sur une large gamme d'échelles spatio-temporelles. La circulation à l'échelle des bassins, responsable de la redistribution de ces traceurs, est fortement influencée par des processus d'instabilité interne à l'océan, en particulier dits de « méso-échelle » (de 20 km à 200 km), de « sous-méso-échelle » (de l'ordre de quelques dizaines de mètres à 10 km), ainsi que par les processus de mélange turbulent, qui jouent un rôle essentiel pour le stockage du carbone et de la chaleur dans l'océan. Ces processus, en interagissant entre eux, façonnent une partie de la circulation à grande échelle de l'océan et sa variabilité. Outre leur rôle dans la circulation océanique grande échelle, ils peuvent affecter les interactions air-mer, océan-cryosphère, et la biosphère marine, et ne sont, à ce jour, pas ou peu pris en compte explicitement dans les modèles climatiques. L'évolution de la dynamique et de la biogéochimie de l'océan à toutes les échelles sous l'effet du changement climatique constitue un défi pour toute prévision numérique, que ce soit les prévisions météorologiques, qui couplent désormais un modèle océan à celui de l'atmosphère, ou les projections climatiques, en passant par les prévisions saisonnières et décennales.

Enfin, si les observations spatiales nous fournissent une couverture globale des paramètres de surface de l'océan,

notre capacité est plus limitée dans l'observation (et la modélisation) de la colonne d'eau océanique. Nous n'avons pas encore acquis une connaissance phénoménologique satisfaisante de la circulation globale de l'océan, des échanges verticaux, et en particulier de la circulation de retournement, ce qui limite notre capacité à anticiper leurs réponses aux changements en cours et futurs ainsi que leur impact sur les changements de dynamique des écosystèmes marins, sur les cycles biogéochimiques, d'énergie et hydrologiques ainsi que sur le climat mondial.

Pour mieux comprendre et prévoir le climat, sa variabilité et ses changements sous l'effet des activités humaines, il est donc nécessaire d'améliorer l'observation, la modélisation et la compréhension des facteurs qui contrôlent la variabilité et la sensibilité du climat, la circulation océanique et atmosphérique, la dynamique des calottes de glace, la qualité de l'air et la composition chimique de l'atmosphère.

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Les forçages du changement climatique dépendent de l'accumulation dans l'atmosphère des gaz à effet de serre mais aussi des espèces à courte durée de vie comme les aérosols. La connaissance, la modélisation et la prévision de ces espèces demandent à être améliorées pour mieux prévoir les forçages radiatifs. Les espèces à courte durée de vie doivent faire l'objet d'une attention accrue : la compréhension et la modélisation plus fine des processus qui leurs sont associés permettra de prévoir leurs tendances et leurs impacts, y compris les mécanismes d'échange entre troposphère et stratosphère, et avec la zone critique. Appréhender ces problématiques conjointement du point de vue du changement climatique et de la qualité de l'air est important, l'objectif *in fine* étant de développer des solutions d'atténuation et d'adaptation bénéficiant à la fois à la qualité de l'air et au climat.

En parallèle, les interactions aérosols-climat aux échelles régionale et globale, souvent dominées par les interactions aérosols-nuages, constituent une source majeure d'incertitude du forçage radiatif. Les particules, avec des sources anthropiques et naturelles, jouent un rôle particulier et complexe. Ils ont des effets radiatifs directs en lien avec leurs propriétés optiques, et indirects par leur rôle sur la microphysique des nuages. Comme évoqué ci-dessus, des recherches sont nécessaires pour améliorer nos connaissances sur les propriétés des aérosols et leur évolution. Des études spécifiques sur les sources et propriétés des noyaux glaçogènes pour une meilleure simulation des nuages froids aux pôles, sur les interactions poussières-nuages, et les sources d'aérosols primaires biologiques devraient permettre de réduire les incertitudes des modèles de climat. Dans l'autre sens, le rôle des nuages sur la composition chimique de l'atmosphère et sur la formation des AOS sont des sujets importants. À grande échelle, les verrous actuels sur les interactions aérosols-nuages sont liés notamment à

l'estimation par les satellites des propriétés des gouttelettes d'eau nuageuse (concentrations, contenu en eau liquide, fraction nuageuse, durée de vie, etc) et à la difficulté d'accès à des observations satellitaires coïncidentes d'aérosols et de nuages ainsi qu'à la méconnaissance des forçages radiatifs liés aux nuages de glace et en phase mixte.

Pour la modélisation, il est nécessaire de quantifier les grandes incertitudes associées à la physique des modèles couplés océan-atmosphère-glace de mer, malgré les biais persistants des modèles de climat (moussons trop sèches, double ITCZ, extension de la cellule de Walker dans les tropiques, sensibilité de la glace de mer aux échanges avec l'atmosphère et l'océan en zone polaire). Ces incertitudes peuvent être structurelles en lien avec la physique des modèles ou inhérentes à leur résolution relativement basse (environ 100 km), impliquant de nombreuses hypothèses à la base des paramétrisations des processus non résolus qu'il est nécessaire de vérifier.

La réduction des incertitudes sur les projections du changement climatique passe d'abord par une meilleure compréhension des processus et de leur sensibilité au réchauffement mondial (en incluant des cibles paléoclimatiques pour lesquelles il existe une contrainte observationnelle), puis par une meilleure représentation de ces processus dans les modèles. Ces deux étapes doivent permettre de réduire les biais structurels des simulations (globales ou régionales), et d'augmenter ainsi la confiance dans la simulation des variables climatiques liées à ces biais. À l'échelle mondiale, il s'agit en particulier de mieux comprendre et représenter la réponse des grandes structures de circulation océanique et atmosphérique au réchauffement climatique.

Certains points de bascule du système climatique retiennent particulièrement l'attention de la communauté en raison des profonds bouleversements potentiels qu'ils entraîneraient dans l'atmosphère et l'océan. Il s'agit par exemple des risques de transformation de la forêt tropicale Amazonienne en savane, du ralentissement et de l'arrêt potentiel de la circulation méridienne de retournement dans l'Atlantique (AMOC, traitée en détail plus loin), de la perte de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique ou de l'augmentation des émissions de CO₂ et de CH₄ dues au dégel du pergélisol.

Il nous reste beaucoup à apprendre sur les processus à petite échelle qui affectent la grande échelle via la cascade d'énergie. C'est le cas par exemple des fines structures océaniques et atmosphériques, des échanges air-mer d'énergie (chaleur, quantité de mouvement) et de gaz (CO₂ et autres gaz à effet de serre, vapeur d'eau)... À ce jour, les études se sont limitées à deux dimensions, principalement à la partie supérieure de l'océan ou aux couches de fond. Il n'existe pas d'études systématiques tridimensionnelles qui déterminent de manière holistique les effets dans l'océan de la fine échelle sur la circulation grande échelle et les cycles

biogéochimiques. Cela représente un défi majeur pour la compréhension et la prévisibilité du climat ainsi que pour la structuration des écosystèmes marins.

Les ondes internes représentent l'essentiel de la variabilité super-inertielle dans l'océan stratifié et couvrent une grande gamme d'échelles, de la centaine de kilomètres à la dizaine de mètres. Elles sont une source majeure du mélange turbulent diapycnal (du mètre au millimètre) qui a des répercussions sur toutes les échelles de la circulation océanique et cela, depuis les plaines abyssales jusqu'à la surface et depuis l'océan ouvert jusqu'aux régions littorales. Aujourd'hui, les modèles de circulation générale ont atteint des résolutions capables de résoudre une partie des ondes internes. En revanche, la dissipation de ces ondes internes a lieu à une échelle beaucoup plus fine que celle résolue par les modèles, et les ondes sont pour l'instant principalement dissipées sous forme numérique, i.e. souvent ni au bon moment ni au bon endroit et donc pas avec les bonnes conséquences. Deux enjeux importants sont, dès lors, 1) la réduction de la dissipation numérique et l'établissement de paramétrisations de la dissipation de ces ondes basées sur la physique des processus sous-jacents, et 2) une meilleure compréhension de l'interaction de ces ondes internes avec la circulation de grande échelle et méso-échelle. Des modèles idéalisés dédiés aux processus d'instabilité et de dissipation sont nécessaires pour mieux prendre en compte ces processus à plus grande échelle, via notamment des paramétrisations.

L'effort de la communauté française vise à aborder de manière holistique, via une approche originale et interdisciplinaire, le continuum d'échelles de la dynamique océanique et des interactions air-mer et mer-glace, ainsi que leurs implications pour les flux d'énergie, la biogéochimie marine, la biodiversité et la dispersion des polluants naturels et anthropiques. En particulier, il s'agira de définir la structure, l'évolution et la phénoménologie de l'océan à fine échelle, physique et biogéochimique, via les observations adaptées (satellitaires, campagnes et surveillance *in situ*) et sa représentation dans les modèles avec un forçage réaliste (atmosphère, glace, marée, ...) pour :

- Quantifier le rôle de la dynamique à petite échelle dans la circulation et la distribution des propriétés océaniques à grande échelle et les cycles de chaleur, d'eau et de carbone critiques pour le climat ;
- Déterminer dans quelle mesure la dynamique océanique à fine échelle interagit avec l'atmosphère, comment elle façonne les écosystèmes marins ;
- Améliorer les futurs modèles du système terrestre en résolvant ou en paramétrant la dynamique à l'échelle sous-mésoéchelle, en revisitant les interactions air-mer et avec la cryosphère ainsi que la redistribution verticale de chaleur et de carbone.

La variabilité interne de l'océan reste mal connue du fait d'observations instrumentales trop courtes, mais aussi de

divergences majeures sur sa représentation au sein des différents modèles de climat de type CMIP. Aussi bien les processus que les échelles de temps prépondérantes diffèrent dans ces modèles, alors que cette variabilité interne pourrait significativement moduler aussi bien le changement climatique passé que celui à venir. Pour progresser, il est donc nécessaire d'identifier la vraisemblance des modes de variabilité interne simulés par les différents modèles de climat en améliorant notre compréhension des mécanismes impliqués. Aux échelles saisonnières à décennales, cela est rendu possible par les données récentes et par une meilleure compréhension des processus internes et des forçages air-océan-cryosphère. Aux longues échelles de temps, les simulations numériques peuvent être confrontées à des reconstructions océaniques suffisamment longues, nécessitant donc le recours à des enregistrements paléoclimatiques, notamment sur la période Holocène.

De plus, la turbulence de méso-échelle est la forme la plus connue de variabilité intrinsèque chaotique (VIC) océanique. Des simulations ensemblistes de l'océan turbulent montrent toutefois que la VIC peut atteindre l'échelle de bassins océaniques sur plusieurs décennies. La forte empreinte de la VIC basse fréquence grande échelle sur le contenu thermique ou la circulation méridienne de retournement, ou « Meridional Overturning Circulation (MOC) », suggère que son caractère aléatoire pourrait se transmettre à l'atmosphère et au climat dans les simulations ou projections couplées résolvant la mésoéchelle. L'interprétation des simulations océaniques et couplées, et des observations océaniques, requiert l'étude des empreintes respectives de la VIC et de la variabilité atmosphérique sur la circulation océanique et les milieux connexes (biogéochimie, atmosphère, cryosphère, etc.).

En ce qui concerne, la dynamique océanique grande échelle, l'absorption et redistribution du surplus de chaleur et de carbone, les transports d'eau douce, de traceurs biogéochimiques et de polluants dans l'océan sont au cœur des questions environnementales actuelles. Une composante cruciale de la dynamique océanique grande échelle contrôlant en partie cette distribution est connue sous le nom de circulation méridienne de retournement, ou MOC. Cette circulation capture et intègre des interactions entre courants de surface, courants profonds, circulations tourbillonnaires, et processus de transformation de masses d'eau par interactions air-mer et mélanges intérieurs. Ces processus sont notamment associés à la formation d'eaux denses en Arctique et Atlantique Nord subpolaire et autour du continent Antarctique. Ces eaux ventilent la plus grande fraction du volume total de l'océan. Aujourd'hui elles séquestrent efficacement la chaleur, l'eau douce, les nutriments, et le dioxyde de carbone dans les couches océaniques profondes et abyssales et gouvernent la circulation océanique globale. Plusieurs études numériques suggèrent que la MOC affecte la circulation atmosphérique ainsi que des modes de variabilité climatique à différentes échelles

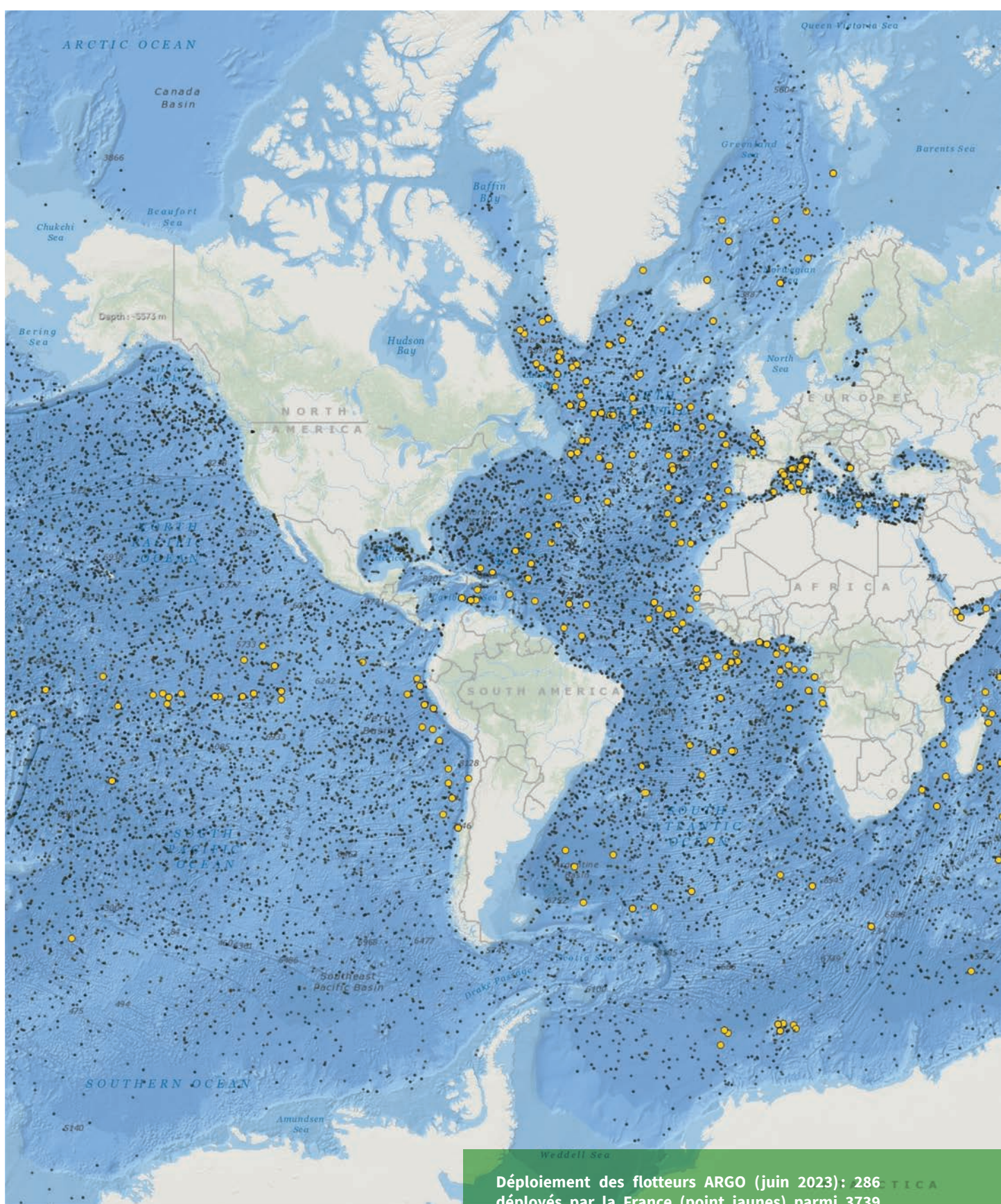
de temps. Ce rôle de régulateur climatique est cependant vulnérable, et le contexte actuel de réchauffement global et de fonte des calottes polaires pourrait réduire l'efficacité de ce mécanisme.

Dans ce cadre, les efforts des communautés françaises et internationales doivent être maintenus sur la compréhension physique de la MOC notamment en Atlantique, dite AMOC, et de sa variabilité passée, récente et future. Il nous faut en particulier :

- Lever les nombreuses limitations et questionnements qui persistent tant sur le plan de la modélisation (ex. difficulté de représentation des courants de bord, couplages air-mer irréalistes, biais climatologiques, variabilité sous-estimée...) que celui des observations (couvertures spatiale et temporelle limitées, cohérence des méthodes de reconstruction, désaccords entre proxys paléo-océanographiques et observations modernes ou modèles de climat) ;
- Comprendre le lien causal entre convection profonde aux hautes latitudes et intensité de l'AMOC, ainsi que la cohérence méridienne de l'AMOC (*i.e.* mode cohérent entre bassins subarctiques, subtropicaux, et tropicaux) en identifiant en particulier les sources de découplage entre bassins ;
- Progresser dans notre connaissance de la circulation profonde qui est essentielle pour anticiper le stockage de chaleur et de carbone dans les prochaines décennies, ainsi que pour améliorer notre connaissance des cycles biogéochimiques et en particulier des traceurs utilisés dans la reconstruction des climats passés.

Comprendre et prévoir la variabilité du climat et de ses différentes composantes (atmosphère, cryosphère, surfaces continentales et océan) requiert notamment de comprendre et prévoir la dynamique atmosphérique à différentes échelles spatio-temporelles, des échelles météorologiques aux échelles climatiques. Les progrès en ce domaine dépendent de l'amélioration du contenu physique des modèles atmosphériques et de leur couplage avec les surfaces, du progrès des méthodes d'assimilation en parallèle de la mise à disposition d'observations de plus en plus riches, de l'implémentation des modèles numériques sur les supercalculateurs de plus en plus puissants, et du développement des approches de prévision d'ensemble. L'expérience montre que les synergies entre développements des modèles et campagnes de mesure, parfois d'ampleur internationale, jouent généralement un rôle très important pour ces avancées.

Plus spécifiquement, plusieurs verrous majeurs nécessitent d'être levés. Cela inclut notamment la compréhension des interactions entre phénomènes dynamiques et convectifs en zones tropicales et aux latitudes tempérées, ou des interactions surface-atmosphère. Concernant la prévision d'ensemble, un verrou majeur se situe à l'articulation entre les techniques d'assimilation de données pour l'initialisation



Déploiement des flotteurs ARGO (juin 2023): 286 déployés par la France (point jaunes) parmi 3739 flotteurs actifs (autres points) dont 195 flotteurs classiques et 91 BGC (tous pris en charge par le CDS CORIOLIS qui traite les données de 732 au total).

© Euro-ARGO



des systèmes de prévision et le post-traitement des masses de données générées. Enfin, une meilleure compréhension de l'effet du changement climatique sur la dynamique atmosphérique est nécessaire pour mieux anticiper les changements régionaux de la température et des précipitations, et l'évolution de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

L'allongement progressif des séries temporelles d'observations issues des sites instrumentés ou de l'espace (e.g. 40 ans de données des satellites géostationnaires sont désormais disponibles), ainsi que les données paléoclimatiques toujours plus nombreuses et disponibles à des résolutions temporelles de plus en plus fines, sont autant d'opportunités pour étudier la variabilité naturelle, les tendances et les points de bascule du système Terre.

Depuis une vingtaine d'années, la France participe aux différents projets internationaux d'intercomparaison des modèles climatiques organisés par le WCRP (tels que CMIP, PMIP, CFMIP), à la fois au travers de ses groupes de modélisation et de sa communauté d'analyse des simulations multi-modèles. Les simulations existantes et à venir sont/seront une opportunité pour étudier de nombreux aspects de la variabilité du système Terre et de son évolution lors des changements climatiques passés, présents et futurs, et pour différencier les aspects robustes des aspects plus incertains de ces simulations.

Une thématique nouvelle émerge pour quantifier de manière rigoureuse l'incertitude due à la calibration des paramètres de nos modèles climatiques. Cependant seul le paramétrage de la physique atmosphérique a été considéré à ce jour. Ces travaux méritent d'être poursuivis et étendus pour quantifier les incertitudes provenant de la physique des différentes composantes du système couplé océan-atmosphère-surface continentale-cryosphère.

La communauté des chercheurs en climatologie ne dispose pas d'une solide compréhension quantitative des moteurs ou des processus impliqués dans le déclenchement des points de bascule du climat, étant donné qu'ils entrent souvent dans la catégorie des événements à « impact élevé, mais à faible probabilité », et qu'ils sont donc assez rarement observés dans les résultats des modèles. C'est pourquoi la communauté internationale s'est structurée pour comparer la sensibilité des modèles de climat couplés aux différents forçages connus comme cause potentielle de points de bascule. Les observations disponibles depuis près de 50 ans seront également utilisées pour développer des indicateurs spécifiques aux points de bascule dits rapides.

La mesure des gaz à effet de serre et des espèces à courte durée de vie bénéficie de nombreux moyens d'observations nationaux (longues séries de mesures sol, aéroportées, sa-

tellites) et de modélisation. La communauté française peut ainsi contribuer significativement aux initiatives internationales visant à établir des bilans de gaz à effet de serre comme CO₂, CH₄ ou l'ozone (troposphérique et stratosphérique) ou aérosols par exemple.

La montée en résolution des modèles et la fiabilisation de nouveaux capteurs (par ex. oxygène, pH) ouvrent un champ large d'études sur (i) les processus assurant l'enrichissement de la couche euphotique en (macro- et micro-) nutriments, (ii) l'évolution des zones anoxiques et (iii) la variabilité spatiale de l'acidification de l'océan. Les processus conduisant à l'upwelling ne se limitent pas à la divergence d'Ekman sur les bords est ou à l'équateur : les dynamiques tourbillonnaires, les interactions courant / topographie, les détachements des courants de bord, le mélange hivernal et convectif, les hétérogénéités du couvert de banquise dans les régions polaires peuvent amener séparément à un enrichissement significatif de la couche euphotique ou au contraire à l'émergence de régions suboxiques à anoxiques. Ainsi, le risque de franchir des seuils physiques et biologiques importants régulant la répartition et la productivité des algues, et des stocks de pêche et le fonctionnement des écosystèmes est accru, avec des enjeux liés à la gestion des écosystèmes marins. La prochaine décennie offre de nouvelles opportunités pour progresser dans la compréhension des interactions entre physique et biogéochimie océanique à fine échelle, grâce au développement des nouveaux systèmes d'observation (satellites à haute résolution ; plateformes autonomes...) et la modélisation à haute résolution et des techniques innovantes de reconstruction en 3D. Cela peut être facilité par des projets intégrés à l'échelle de la communauté (par exemple EUREC4A, SWOT, OdySea...) ; et le PEPR TRACCS est une opportunité pour aborder toutes ces questions (détection/attribution, couplage calottes/OAG-CM, scénarios, etc).

RECOMMANDATIONS

La compréhension de la turbulence océanique bénéficiera d'une meilleure observation de la circulation de petite-échelle. Les observations satellites à haute résolution offrent de nombreuses opportunités d'étude de la dynamique à différentes échelles dans la couche supérieure, et en particulier des ondes internes, de leur propagation et de leur non-stationnarité. Les observations actuelles souffrent cependant de lacunes concernant la composante agéostrophique des courants de surface, et le maintien des observations de salinité de surface par satellite est compromis, en dépit du lourd investissement de la communauté et de résultats prometteurs. Les observations *in situ* de la fine

échelle et du mélange dans des régions contrastées sont encore insuffisantes et les efforts doivent être maintenus pour généraliser ces mesures à une plus grande majorité de campagnes en mer. Un effort particulier est d'intégrer des capteurs de microstructure mesurant la turbulence sur des engins autonomes couplés à des capteurs biogéochimiques (gliders, flotteurs profileurs). L'amélioration de la représentation de la circulation océanique dans les modèles, à toutes les échelles d'espace et de temps, passera nécessairement par une meilleure paramétrisation de la fine échelle et de la turbulence océanique et de son influence sur les processus biogéochimiques.

La compréhension et la prévisibilité de la MOC nécessitent de maintenir les efforts nationaux en collaboration internationale et interdisciplinaire (incluant la paléoclimatologie, la biogéochimie et en travaillant de manière collaborative entre communautés de modélisation et observation) pour reconstruire et comprendre la variabilité passée, présente et future de la MOC sur une large gamme d'échelles spatiales et temporelles. Il nous faut progresser dans l'identification des processus gouvernant cette variabilité et les éventuels points de bascule. Ces processus et les proxys associés nécessitent d'être évalués dans les modèles numériques forcés et couplés de résolution croissante, en affinant leur attribution (naturelle versus anthropique, forçage externe versus variabilité interne). Enfin, le couplage entre la cryosphère et la MOC doit être mieux pris en compte en s'appuyant sur les données paléo-océanographiques, pour identifier quelles paramétrisations permettent de représenter les variations passées du volume des glaces et de l'intensité de la MOC.

Enfin, le maintien d'une communauté scientifique diverse et active dans le domaine de l'étude de la dynamique atmosphérique et de la prévisibilité des phénomènes météorologiques est essentiel pour continuer d'améliorer à la fois notre compréhension de la variabilité du système climatique et la prévision météorologique, avec ses multiples enjeux de prévention des risques de catastrophe et d'accompagnement de nombreux secteurs socio-économiques. Le renforcement des collaborations entre acteurs académiques et ceux de la prévision météorologique opérationnelle est crucial pour ces progrès, par exemple via une réflexion entre ces acteurs sur une nouvelle génération de modèles adaptée aux questions actuelles de recherche et de prévision. Les synergies avec les acteurs de l'enseignement supérieur des sciences météorologiques sont aussi importantes pour maintenir et développer les connaissances et compétences en matière de compréhension et conceptualisation de la dynamique atmosphérique et ses liens avec la prévisibilité des phénomènes.

SWOT

La mission SWOT (Surface Water Ocean Topography), lancée par NASA/CNES en décembre 2022, fournira des observations globales à large échelle de la topographie de la surface de la mer à fine échelle, des courants géostrophiques et de leurs gradients, ainsi que des marées océaniques et des marées internes sur une période de 3,5 ans. La résolution des courants géostrophiques de surface en 2D, jusqu'alors limitée à ~100 km, passera à 15 km avec une couverture jusqu'aux côtes et aux hautes latitudes (78°). SWOT fournira également des images SAR conjointement avec les courants géostrophiques pour étudier les changements de la rugosité de surface à petite échelle, et étudier le couplage océan-atmosphère à travers les fronts et les tourbillons jusqu'alors non résolus par l'altimétrie. SWOT sera accompagné d'une série de 18 campagnes en

mer internationales en 2023 soutenue par CLIVAR, y compris 5 campagnes françaises, pour documenter la structure verticale des processus méso- à sub-méso-échelle sous les traces de SWOT dans différents régimes dynamiques et différentes saisons (swot-adac.org).

Ces observations 2D uniques de SWOT seront une opportunité pour analyser les processus dynamiques côtiers et en haute mer à plus haute résolution : elles seront combinées avec d'autres données satellitaires et des données *in situ*, pour validation et assimilation dans des modèles à haute résolution. Cela doit s'accompagner de développements méthodologiques pour intégrer l'énorme volume de données dans de nouveaux produits cartographiés en 3D ou dans des systèmes de modélisation ou de prévision océaniques à fine échelle.

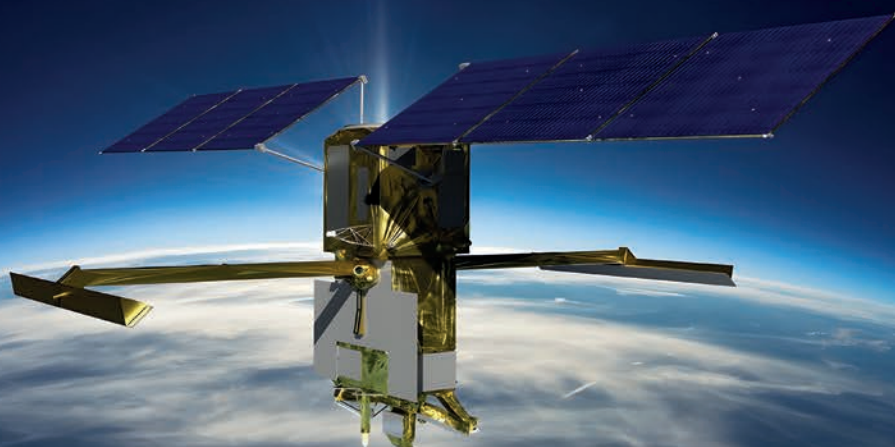


Illustration du satellite Swot, devant la Terre, avec ses panneaux solaires déployés. Swot suit depuis janvier 2023 les eaux à la surface de la Terre (océaniques et continentales) avec une précision inégalée, avec l'aide d'un altimètre innovant appelé KaRIn (Ka-band Radar Interferometer, « interféromètre radar en bande Ka »).

© CNES / Mira productions

Défi « Événements extrêmes : caractériser, comprendre et anticiper »

Certains événements météorologiques, océanographiques ou géophysiques rares dans au moins une de leurs caractéristiques (leur intensité, leur durée ou leur localisation par exemple) induisent, quand ils se produisent, des conséquences considérables sur l'environnement ou la société.

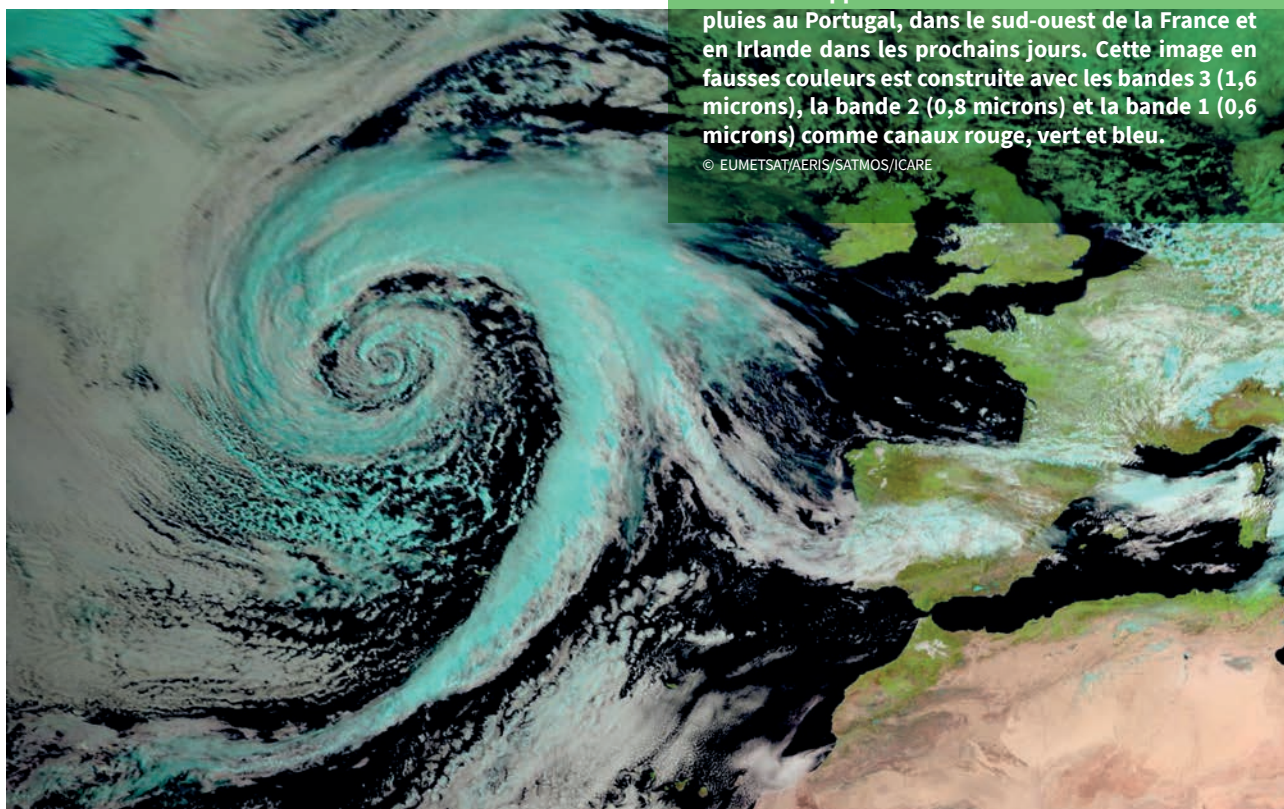
Ces phénomènes extrêmes peuvent être d'origine atmosphérique (vagues de chaleurs, sécheresses, précipitations intenses, rafales de vent, phénomènes cycloniques extrêmes), océanique (vagues de chaleurs marines, submersions côtières, des phénomènes d'eutrophisation extrême avec hypoxie voire anoxie, des phénomènes de blanchissement des coraux, des blooms exceptionnels de phytoplancton, éventuellement toxique), géophysique (effet des éruptions volcaniques sur la composition de l'air) ou induits par une variété de facteurs naturels ou humains (méga feux provoqués par la sécheresse, la foudre ou les feux de biomasse). Dans tous les cas, ils constituent des manifestations directes, spectaculaires mais surtout très impactantes des phénomènes du domaine océan-atmosphère en lien avec des enjeux sociétaux. Les impacts et risques induits par ces phénomènes sont directement liés à l'articulation entre ces aléas et l'exposition et la vulnérabilité des socio-écosystèmes à la surface terrestre.

LES ENJEUX ET QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Le changement climatique est susceptible de modifier les caractéristiques des **extrêmes météorologiques**. L'augmentation de la fréquence et de la sévérité des vagues de chaleur atmosphériques sous l'effet du réchauffement climatique a été démontrée par des méthodes rigoureuses de détection et attribution, et elle constitue un résultat majeur du dernier rapport du GIEC. C'est également le cas pour l'intensité des précipitations extrêmes, par exemple sur la rive nord de la Méditerranée. Pour d'autres phénomènes (orages, grêle, rafales sous orage par exemple), les résultats d'attribution sont moins conclusifs : leur complexité et leur petite taille rendent leur simulation plus difficile dans un cadre de modélisation climatique, et ces mêmes caractéristiques limitent la capacité à disposer d'observations suffisamment fiables et de long terme pour caractériser des tendances et les interpréter. Pour les mêmes raisons, ces phénomènes sont plus difficiles à observer en temps réel et à anticiper avec les techniques de prévision numérique du temps, qui atteignent des limites de prévisibilité.

Cette image en fausses couleurs, capturée par MSG-4/Meteosat-11/SEVIRI le 9 avril 2022 à 9h00 UTC, montre un système dépressionnaire se formant dans l'océan Atlantique Nord en direction de l'Europe occidentale. Il apportera des rafales de vent et de fortes pluies au Portugal, dans le sud-ouest de la France et en Irlande dans les prochains jours. Cette image en fausses couleurs est construite avec les bandes 3 (1,6 microns), la bande 2 (0,8 microns) et la bande 1 (0,6 microns) comme canaux rouge, vert et bleu.

© EUMETSAT/AERIS/SATMOS/ICARE



Outre les précipitations extrêmes, les phénomènes convectifs sont à l'origine de nombreux autres événements extrêmes tels que la foudre, les rafales de vents ou les cyclones tropicaux. L'anticipation de ces phénomènes, tant à l'échelle météorologique qu'aux échelles de temps du changement climatique, est un enjeu majeur pour la société. Pour progresser dans la prévision de ces phénomènes aux différentes échelles de temps, il est nécessaire d'améliorer notre compréhension physique des processus (par exemple les conditions d'une amplification rapide des cyclones tropicaux) et leur représentation dans les modèles numériques (par exemple la représentation des phénomènes d'électricité atmosphérique et de la formation des éclairs).

Les extrêmes combinés (*compound events*) font l'objet d'une attention renforcée car l'impact d'un événement extrême est souvent plus sévère lorsqu'il se produit en concomitance avec un autre événement extrême ; c'est le cas par exemple lors de la survenue de tempêtes en série ou d'une inondation se produisant peu après un épisode de sécheresse.

Plusieurs verrous limitent actuellement notre capacité à caractériser, comprendre et prévoir les événements extrêmes météorologiques :

- la durée limitée des séries d'observation permettant de documenter l'évolution spatio-temporelle des phénomènes extrêmes (« simples » ou composés) et leurs impacts éventuels ;
- les limites instrumentales qui nécessitent de développer de nouveaux capteurs aux caractéristiques de mesures élargies, et de conception originale pour des mises en œuvre en milieu extrême (par exemple mesures hydrodynamiques en zone de déferlement, ou systèmes de détection d'initiation de fractures sur falaises) ;
- les limites de notre compréhension physique des processus conduisant au développement de phénomènes extrêmes, notamment le rôle de la dynamique atmosphérique (e.g. blocages) et des surfaces continentales (e.g. nature et humidité du sol) dans les sécheresses, canicules et îlots de chaleur urbains, ou le rôle de l'organisation de la convection et des interactions océan-atmosphère dans le développement des événements de précipitation extrême et des cyclones ;
- les limites des systèmes de modélisation (complexité, couplage, résolution) dans leur capacité à représenter les phénomènes générateurs d'événements extrêmes, tant pour les simulations aux échelles climatiques que pour les analyses et prévisions en temps réel, et l'imparfaite quantification des incertitudes de ces simulations ;
- les limites méthodologiques pour l'analyse des phénomènes extrêmes, leurs tendances et leur attribution éventuelle au changement climatique ;
- les difficultés à articuler aléas (phénomènes extrêmes) et autres facteurs de risque (exposition, vulnérabilité), afin de nourrir les réflexions interdisciplinaires en réduction de risques de catastrophes.

Les éruptions volcaniques et les grands feux de biomasse sont des phénomènes à caractère potentiellement intense et peu prévisible, avec des perturbations significatives engendrées sur la composition atmosphérique troposphérique et stratosphérique, le bilan radiatif et le climat, et des interactions et rétroactions entre les différents effets. Si les éruptions volcaniques sont entièrement naturelles, les feux de biomasse, bien que faisant partie intégrante du cycle naturel de la végétation, sont utilisés dans de nombreux pays en agriculture et gestion forestière pour l'entretien des parcelles. Ils sont aussi la résultante de boucles de rétroactions du réchauffement, liées à la sécheresse ou à la prolifération de ravageurs forestiers par exemple.

Les feux, notamment non contrôlés (« wildfires » en anglais) et les éruptions volcaniques peuvent avoir de nombreux impacts : écologiques, socio-économiques, patrimoniaux ou sanitaires. La fréquence des feux extrêmes semble augmenter ces dernières années en raison du changement climatique (sécheresse, vagues de chaleur). En parallèle, des éruptions volcaniques de forte intensité ont été recensées. Plusieurs questions et défis se posent à la communauté pour quantifier ces perturbations et comprendre l'effet des grands feux et éruptions volcaniques sur les niveaux de fond atmosphérique, le bilan radiatif global mais aussi la qualité de l'air régional et le climat à différentes échelles.

Les premières interrogations concernent la caractérisation des émissions : quels sont les principaux facteurs d'émissions ? quelles sont les surfaces brûlées ? Quelles quantités et quelles sont les caractéristiques de la biomasse consommée ? En second lieu, la question sur l'altitude d'injection des panaches demeure. Des observations satellitaires de l'altitude des panaches d'aérosols commencent à émerger et pourraient fournir des contraintes pour améliorer notre compréhension de ces hauteurs d'injection dans les modèles, et comment faire pour mieux la représenter.

Des questions sur l'évolution chimique des panaches persistent : Quelle évolution des espèces gazeuses réactives et de la formation d'ozone au cours du transport ? Quel rôle pour la chimie des halogènes ? Quelle formation d'aérosols secondaires (organiques ou inorganiques) ? Quel impact du vieillissement (physique et chimique) et du mélange de différentes espèces d'aérosols sur l'évolution des propriétés optiques et radiatives des panaches ? Quel impact des aérosols sur la météorologie et le climat (régional/global) ? la dynamique atmosphérique et les nuages ? Quelles rétroactions sur les émissions et le transport tridimensionnel des espèces atmosphériques ? Au-delà de l'échelle globale et des applications à l'Europe, pour répondre à ces questions la communauté porte une attention particulière aux régions boréales et à l'Afrique centrale et australe pour les feux, et aux régions impactées par les fortes éruptions.

Les événements extrêmes océaniques comprennent les vagues de chaleur marine, les tsunamis et les submersions



Vue d'une structure de cumulus (plus réfléchissant) émergeant de la grande masse brunâtre d'un panache de feux. Cette image prise en Namibie au cours de la campagne AEROCLO-SA depuis le Falcon 20 de Safire volant à environ 8 km d'altitude au-dessus des panaches de feux illustre combien ceux-ci peuvent affecter le bilan radiatif et les propriétés des nuages. Les feux de forêt sont l'une des sources les plus importantes de particules dans l'atmosphère, particulièrement en Afrique. Les aérosols émis par les feux contiennent des composés absorbant le rayonnement mais également des composés hydrophiles qui facilitent la formation de nuages cumuliformes sur de très grandes étendues et à haute altitude.

© Frédéric Blouzon / SAFIRE / CNRS Image

côtières dues à un ensemble d'événements à haute fréquence (marées, vagues, ondes de tempête : voir la section Aire prioritaire continuum continent-océan). Des événements extrêmes peuvent également dégrader l'oxygénation des eaux de subsurface jusqu'à l'anoxie, et également rendre les eaux moins basiques (pics d'acidification).

Les vagues de chaleur marine (VCM) sont des épisodes d'anomalies de températures océaniques extrêmement chaudes, pouvant durer de quelques jours à plusieurs mois. Avec des anomalies de surface pouvant atteindre 5°C, elles ont des conséquences dramatiques sur les écosystèmes océaniques et côtiers (blanchiment des coraux, prolifération d'algues nuisibles, impact sur l'aquaculture, la distribution des espèces marines et les stocks de poissons) et affectent les interactions air-mer, les variations de la mousson et l'intensification des cyclones. Des observations récentes indiquent que la fréquence et l'intensité des VCM ont considérablement augmenté au cours du siècle dernier, tandis que les modèles climatiques prévoient pour les décennies à venir la poursuite de ces tendances avec des VCM plus fréquentes, plus intenses et également plus durables.

Les changements, par des facteurs physiques, dans la circulation océanique ou dans les flux air-mer sont à l'origine de ces VCM, et ce en réponse soit à la variabilité atmosphérique à court terme, soit à la variabilité des modes climatiques (cf

défi « tendances, variabilité »). Certaines VCM peuvent être prévues des mois à l'avance, notamment si elles résultent de changements dans la circulation océanique ou d'influences des modes climatiques. Cependant, notre capacité à évaluer avec certitude l'évolution future des VCM est actuellement entravée par le manque de connaissance (I) sur les processus à petite échelle, non résolus dans les modèles climatiques utilisés pour les projections et (II) sur la séquence sous-jacente des processus, observés par des déplacements et des mortalités d'espèces marines. Si l'impact des VCMs sur la désoxygénation, la production primaire, le stress thermique, à la surface et aux niveaux trophiques moyens où se nourrissent les poissons et les oiseaux de mer sont documentés, ces effets ne sont toujours pas bien compris ni correctement inclus dans les modèles utilisés pour les projections dans un climat changeant.

Les **épisodes hypoxiques/anoxiques** concernent en premier lieu les grands systèmes de bord-est océaniques (sys-

tème du Pérou-Chili et Afrique de l'Ouest en particulier), mais également les zones littorales métropolitaines et outre-mer, souvent en lien avec des problématiques d'anthropisation par les activités agricoles. Une importante sensibilité aux conditions physiques (courants, stratification, température) et les effets de mémoire sur des échelles de temps de plusieurs semaines voire mois (par ex. impliquant des processus de dégradation dans les sédiments) rendent la compréhension et la prévision de ces épisodes difficiles.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

La communauté océan-atmosphère française, dans un cadre de collaborations internationales, dispose de nombreux atouts, de compétences et de forces pour s'attaquer aux verrous de la compréhension et de la prévision des événements extrêmes. Notamment, le PEPR TRACCS a placé la question des extrêmes au cœur de ses objectifs, y consacrant un de ses projets ciblés. D'autres PEPR fortement concernés par les extrêmes (IRIMA, OneWater, BRIDGES) constitueront, par leurs projets ciblés ou leurs appels à projet, des opportunités de progrès et de rassemblement de communautés pour s'attaquer à ces enjeux. La poursuite des travaux collaboratifs associant des communautés de mathématiques avec le domaine OA (GdR Théorie et climat, IMPT, OMER notamment) sont aussi des opportunités de progrès pour l'étude des extrêmes.

En termes de **phénomènes météorologiques extrêmes**, nous sommes à l'aube d'une véritable « décennie de la convection atmosphérique » en matière d'observation et de modélisation. De nouvelles missions spatiales (telles Météosat Troisième Génération, EarthCARE, C3IEL/INCUS, C2O-MODO) viendront bientôt apporter des informations sans précédent, et à haute résolution spatiale et temporelle, sur la structure interne, la dynamique et l'environnement des systèmes convectifs (e.g. vitesses verticales, flux de masse, microphysique, éclairs). Elles permettront également de mieux caractériser les conditions météorologiques dans lesquelles les phénomènes extrêmes se développent (par ex. leur lien avec les conditions et hétérogénéités de surface ou les structures dynamiques de méso-échelle ou de grande échelle). De nouvelles stratégies d'observation, telles que l'utilisation de drones, d'aéroclippers ou de télédétection aéroportée en visée horizontale, aideront à sonder les environnements extrêmes d'accès difficile (par exemple au voisinage des cyclones ou des systèmes convectifs particulièrement intenses) ; cet ensemble de vecteurs permettra ainsi d'explorer une large gamme d'échelles spatiales et temporelles inhérente aux systèmes convectifs.

En parallèle, la modélisation océan-atmosphère à des résolutions toujours plus fines aidera à mieux résoudre les systèmes atmosphériques conduisant aux événements extrêmes. Notamment, la représentation de la structure méso-échelle des systèmes convectifs et nuageux, dans les modèles de résolution kilométrique, aidera à mieux repré-

senter les extrêmes de pluie, les rafales de vent et les éclairs. Le couplage océan-atmosphère aidera à mieux représenter l'interaction des cyclones tropicaux (trajectoire, intensité et rapidité de l'intensification) avec l'océan de surface, la meilleure représentation de l'orographie aidera à mieux représenter les phénomènes de blocage atmosphérique qui peuvent être à l'origine d'extrêmes de température.

Enfin, certaines observations nouvelles pourront directement être assimilées dans des outils de prévision météorologique (ce sera le cas par exemple des données du nouvel imageur d'éclairs sur Météosat Troisième Génération qui permettront de mieux initialiser la prévision des phénomènes méditerranéens), et l'attribution des événements extrêmes au changement climatique sera facilitée par le développement de méthodes statistiques avancées d'analyse des observations et des simulations employant par exemple des techniques d'apprentissage automatique. À noter que la compréhension et la prévision des événements extrêmes liés à la convection atmosphérique sont abordés plus spécifiquement dans le Défi « convection ».

À propos des éruptions volcaniques et feux, le manque d'observation est l'un des points bloquants pour une meilleure compréhension (et simulation) des processus liés à ces événements extrêmes. Les moyens aéroportés, spatiaux et *in situ* de la communauté OA offrent à cet égard de nombreuses opportunités de progrès (voir aussi Défi « Anthropisation et pollutions »). Enfin les bases de données dédiées sont aussi des atouts (par ex. VOLCPLUME).

Le programme d'observations aéroportées IAGOS permet un suivi systématique de la composition de l'air. Toutefois, une spécificité de l'observation des panaches de feux ou de volcans est la nécessité d'une grande flexibilité en termes de plans de vols, et la possibilité de voler sur de longues distances. Cela a pu être réalisé au-dessus des régions boréales par exemple, du fait de l'étendue des panaches, mais de manière encore limitée en Afrique. De nouveaux projets sont portés ou en gestation par la communauté pour étudier les feux sur l'ensemble de ces régions, notamment en Alaska, au Congo, en Namibie, et en Afrique du Sud. De ce point de vue, l'acquisition de nouvelles capacités aéroportées au niveau national (projet ANVOLE de Safire au sein de l'IR IN-AIR) est très attendue pour permettre de telles explorations, et le développement de nouvelles synergies d'observation entre mesures *in situ* et la télédétection active et passive.

La synergie d'observations sol, aéroportées et ballon permise par des initiatives, telles que celle mise en oeuvre durant la campagne ACROSS-PANAME réalisée pendant l'été 2022 en Ile de France, offre également l'opportunité de mieux évaluer notre capacité à prévoir et simuler l'impact des feux en France, et d'analyser les processus en jeu. Cette synergie permettra d'étudier les processus sous-jacents aux impacts sanitaires, en lien avec le transport de panaches de fumée dans les agglomérations urbaines.

De manière plus systématique, le développement récent (voir bilan instrumental; p.30) de méthodologies innovantes pour déterminer à partir d'observations spatiales la distribution tridimensionnelle, la composition et les propriétés optiques des aérosols donne accès à des données précieuses qui pourront être exploitées pour améliorer le suivi et la quantification de l'impact des panaches de feux et de volcans. Les imageurs hyperspectraux géostationnaires comme MTG-IRS ouvriront la voie à un échantillonnage spatial et temporel supérieur à ce que permettent aujourd'hui les sondeurs en orbite polaire.

La communauté française OA est particulièrement engagée dans des programmes internationaux (CLIVAR, GO2NE) visant à comprendre les **vagues de chaleur marine et les épisodes de désoxygénation**, en particulier leurs impacts sur les régions tropicales et subtropicales, et sur les régions côtières (voir infra les sections dédiées à ces aires prioritaires).

- Établir des approches et des définitions qui caractérisent correctement les événements extrêmes (individuels ou composés) pour diverses applications océaniques et côtières.
- Caractériser l'expression en subsurface de ces événements extrêmes dans différentes régions, et la relation avec leurs signatures de surface.
- Étudier les principaux mécanismes responsables de l'apparition des événements extrêmes dans différentes régions (de l'océan hauturier jusqu'aux estuaires - cf PPR Océan / RIOMAR) et saisons. Ces mécanismes comprennent des processus locaux, généralement diagnostiqués par l'analyse du bilan associé (chaleur, O₂), et des influences lointaines provenant de modes de variabilité climatique à grande échelle.
- Examiner la fidélité des modèles climatiques et des systèmes de prévision opérationnels dans la simulation d'événements extrêmes intenses présentant les caractéristiques observées et résultant des mêmes mécanismes que ceux observés.
- Évaluer les contributions relatives du changement climatique et de la variabilité interne du climat dans la probabilité d'occurrence de VCMs intenses historiques et futures dans différentes régions du monde.

RECOMMANDATIONS

Les enjeux et attentes socio-économiques liés aux événements extrêmes dans le domaine océan-atmosphère sont très élevés, ce qui constitue un facteur de motivation, d'opportunités, mais aussi de pression pour la communauté scientifique, fortement sollicitée pour décrire, expliquer et mettre en perspective les phénomènes extrêmes qui se produisent à haute fréquence, ou avec des fréquences ou des intensités qui tendent à augmenter. Il importe de continuer d'adosser les discours scientifiques sur des connaissances développées par des méthodes robustes, et d'explicitier les manques de connaissances sur certains phénomènes et leur lien possible avec le changement climatique.

SOLUTIONS ET OPTIONS D'ACTION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le rôle du domaine océan-atmosphère dans les transitions au cœur du défi climatique

L'humanité est confrontée à un défi climatique d'une ampleur inégalée et dont l'origine humaine ne fait plus de doute. Maintenir le réchauffement climatique en dessous de la limite de 2°C implique une réduction des émissions de gaz à effet de serre de moitié en 2050 par rapport à 2010 et d'atteindre la neutralité carbone entre 2050 et 2100. L'usage de l'énergie représente environ 75 % des émissions (au sein duquel la production d'énergie représente environ 35 % et les transports 15 %), l'agriculture, la foresterie et l'usage des sols en représentent environ 20 %. Des solutions nouvelles sont à inventer pour préserver nos ressources naturelles, subvenir aux besoins énergétiques et alimentaires de la planète, et limiter les effets des changements climatiques. Les scientifiques enrichissent le corpus de connaissances scientifiques, collectent des observations, produisent des simulations qui peuvent directement ou indirectement servir l'action pour soutenir la transition vers les énergies propres, et la transition verte pour l'agriculture, l'alimentation et l'affectation des terres. Quels sont les atouts du domaine océan-atmosphère pour soutenir l'action et développer des solutions d'adaptation et d'atténuation ? L'ensemble des échelles de temps doivent être mobilisés : l'étude du climat à long terme est indispensable pour nourrir les démarches d'adaptation transformante, et affiner la quantification des effets des démarches d'atténuation. Le suivi en temps réel et l'anticipation à l'échelle de quelques heures, jours, semaines, sont critiques pour réduire les impacts de phénomènes prévisibles à fort impact, et concourent ainsi à l'adaptation par une meilleure alerte précoce (cf engagement de l'ONU de développement d'alertes précoces d'ici 2028 pour l'ensemble de la population mondiale). Au sein de la communauté OA, l'expertise couvre l'ensemble de ces échelles de temps et les interactions sont fécondes entre mobilisation des connaissances et outils aux échelles « météo » et « climat », tant du point de vue de l'identification des verrous physiques et biogéochimiques et les progrès dans leur résolution, que des interactions avec d'autres communautés dans des cadres inter et transdisciplinaires.

1) Les sciences du climat pour les grandes transitions

1.1. Les expertises OA au service de l'action

Les expertises variées du domaine OA répondent à des besoins essentiels de ces grandes transitions en termes :

- d'évaluation et de prévision de la production et de la demande énergétique. Ces besoins sont clés en amont de la construction de projets de fermes de production renouvelables, pour leur dimensionnement, et en aval pour leur opération. Ils sont également nécessaires pour la gestion et l'opération des réseaux énergétiques ;
- de développement de systèmes énergétiques qui incluent les systèmes de production renouvelable (éolien, solaire photovoltaïque, solaire thermique, hydro-électrique au fil de l'eau ou en barrage, hydrolien,...), de nouvelles applications des systèmes énergétiques qui permettent de maximiser la préservation environne-

mentale et minimiser les conflits d'usage (e.g. agrivoltaïque pour la co-production énergétique et agricole), les réseaux énergétiques qui assurent l'équilibre offre/demande énergétique ;

- de quantification du risque climatique en appui à l'adaptation et l'accroissement de la résilience des socio-écosystèmes, notamment les systèmes énergétiques et agricoles mais aussi les enjeux liés aux risques naturels et la modification des caractéristiques des aléas météorologiques – le plus souvent leur amplification – sous l'effet du changement climatique ;
- de capture directe de CO₂ et séquestration (en lien avec les biogéochimistes continentaux et océaniques) ;
- de rétroactions entre infrastructures énergétiques et modification de l'usage des sols (énergie, alimentation) sur le climat.

1.2. Le besoin d'observations long-terme (>10 ans)

Le développement de solutions innovantes nécessite des démonstrateurs dont l'évaluation de la pertinence repose souvent sur une approche trop compartimentée entre énergie, alimentation, environnement. La communauté OA est un acteur majeur de l'observation long-terme de l'environnement au travers des OSU (services d'observation, sites d'expérimentation... ex. réseau ACTRIS). Envisager des infrastructures jointes permettant en un même lieu d'opérer et évaluer des systèmes énergétiques ou agricoles dans un environnement surveillé par des moyens de mesure, est un enjeu fort pour accélérer le déploiement des solutions pour les grandes transitions.

1.3. La nécessité d'une approche inter-disciplinaire

Pour répondre au défi du changement climatique, de la transition énergétique et agro-alimentaire, il faut étudier les problèmes de façon systémique en intégrant toute leur complexité. L'interdisciplinarité doit être au cœur de la démarche. Certaines initiatives se sont structurées par la création de centres ou instituts financés dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir et coordonnés par des laboratoires OA tels que le centre interdisciplinaire Energy4Climate (E4C) ou l'Institut de convergence CLAND sur les solutions d'aménagement du territoire pour gérer les transitions écologique et énergétique du XXI^e siècle. Ces exemples ne sont pas les seuls existants mais leur fonctionnement est très structuré et ils rassemblent des équipes de recherche très interdisciplinaires, souvent au niveau d'un site universitaire. Ils peuvent constituer le point de départ d'actions à étendre dans d'autres endroits dans une approche de complémentarité, de réseaux en lien possibles avec les activités d'observation au sein des OSU, stations marines...

2) Les services climatiques en soutien à l'action

Les services climatiques offrent une aide à la décision à partir d'informations sur le climat qui permettent aux particuliers et aux organisations de prendre des décisions ex ante. Il y a 10 ans, le portail de données DRIAS a été ouvert, dans le cadre d'une collaboration entre le CNRS (notamment IPSL), CERFACS et Météo-France. L'objet principal du projet DRIAS était la mise à disposition de scénarios climatiques régionalisés réalisés dans les laboratoires français de modélisation du climat. Il s'inscrivait dès le départ dans une vi-

sion plus vaste d'un appui au développement de « services climatiques », permettant la production d'information et des services – notamment l'accès à des données utiles – sur le changement climatique en France. En 10 ans, DRIAS a enrichi son service en accompagnant les utilisateurs sur l'utilisation et les bonnes pratiques pour les projections climatiques, en permettant de visualiser et géolocaliser les projections climatiques en un lieu donné et en offrant la possibilité de télécharger indicateurs climatiques sous forme de données numériques. Continuer à améliorer le service rendu par des services climatiques est l'objectif du PEPR TRACCS (TRANSformer la modélisation du Climat pour les services Climatiques) financé par France 2030 qui vise à transformer la modélisation du climat pour affronter les défis actuels et répondre aux attentes sociétales en améliorant connaissances et outils concernant les impacts et risques climatiques, et contribuant au développement des services climatiques. Au cœur des recherches associées, l'amélioration de la modélisation de processus clés en matière d'impacts, la production de grands ensembles de projections et le développement de méthodes statistiques avancées et d'intelligence artificielle pour caractériser les extrêmes climatiques, accélérer les modèles, et développer des émulateurs permettant de mieux quantifier les incertitudes associées aux impacts du changement climatique sur différents secteurs d'activité (énergie, agriculture, ressources en eau...) et différents territoires. La communauté OA doit contribuer à organiser un cadre propice à un dialogue entre scientifiques et parties prenantes afin de co-construire des prototypes de services climatiques dans une approche transdisciplinaire et multi-sectorielle.

3) L'innovation au service de l'action

Le partenariat entre le monde académique et le monde socio-économique et financier doit être renforcé car l'urgence climatique impose que tout dispositif de recherche permettant d'accélérer la décarbonation des activités, en particulier en lien avec les secteurs de l'énergie et de l'alimentation, soit le plus rapidement déployé sur le terrain par les acteurs privés ou les administrations publiques. Le domaine OA a des ressources à valoriser comme solutions ou en support à des solutions pour les grandes transitions. En mobilisant les capacités d'innovation, il est possible d'opérer une transformation vers une économie sobre en carbone, tout en participant à la création d'emplois en lien avec les expertises de nos laboratoires. Les exemples de valorisation d'innovations sont multiples dans le cadre du domaine OA et prennent plusieurs formes :

- protection de programmes ou logiciels ou brevets avec licence d'utilisation par des acteurs privés (e.g. PVSCOPE opéré par EDF S&F) ;
- pré-maturation et maturation de solutions innovantes dans des SATT ou incubateurs (e.g. lidars pour la mesure du CO₂ et CH₄) ;
- création de startups avec des applications opérationnelles (e.g. LEOSPHERE : lidars pour l'énergie et la qualité de l'air ; AMPHITRITE : fusion de données satellitaires et in situ à l'aide de l'intelligence artificielle pour produire des données océanographiques pour la prise de décision) ;
- prototypage de services climatiques (e.g. PEPR TRACCS).

Pour améliorer notre connaissance et notre capacité à anticiper les événements extrêmes, il s'agira d'améliorer :

- les instruments et méthodes de mesures en contextes extrêmes en étendant par exemple les amplitudes de mesures, en améliorant leur robustesse ou en développant de nouveaux concepts ;
- la capacité à documenter, sur des séries les plus longues, homogènes et à meilleure résolution possible, l'évolution de quantiles élevés des distributions des variables atmosphériques et océaniques ;
- la capacité à doter les systèmes de modélisation du niveau de complexité et de résolution approprié pour représenter les phénomènes extrêmes (enjeux du couplage océan/vague/atmosphère/surfaces continentales, enjeux de résolution horizontale et verticale, complexité des schéma numériques intrinsèques, taille des ensembles produits pour analyser les extrêmes etc.) ;
- le développement de méthodes permettant de combiner observations et simulations pour mieux comprendre les facteurs qui contrôlent le développement des phénomènes extrêmes et mieux anticiper ces événements à courte échéance, ainsi qu'aux échelles temporelles plus longues et dans les projections climatiques, tout en documentant les incertitudes associées ;
- la combinaison d'observations et simulations reposant sur une animation scientifique transverse à la thématique, notamment aux croisements des infrastructures d'observation ou de gestion des données, avec la coordination de campagnes d'observation multi-plateformes et la construction de base de données dédiées ;
- la poursuite de travaux interdisciplinaires permettant d'inscrire l'étude des aléas géophysiques du domaine océan-atmosphère dans une approche de risque plus globale, permettant à la fois de faire bénéficier des communautés tierces de l'expertise de la communauté océan-atmosphère, et d'enrichir ses propres travaux et progrès.

La problématique du suivi des feux, des panaches de pollutions, et des éruptions volcaniques est aussi une problématique de crise. Un des points importants est donc également de s'assurer que la communauté a une capacité d'alerte et de réaction rapide, tant sur le plan de la modélisation que de l'observation, avec des moyens légers déployables, éventuellement prépositionnés, et une logistique adaptée.

Enfin, les nombreux impacts écologiques (biodiversité, productivité marine), socio-économiques ou sur la santé humaine des événements extrêmes conduisent à des questions interdisciplinaires à l'interface avec la société. Cela incite notamment à penser à des services qui pourraient aider à une meilleure information des populations. Articuler ces activités, de manière équilibrée, avec les développements de services opérationnels publics ou privés est aussi un enjeu pour la communauté.

Défi « Convection atmosphérique »

LES ENJEUX

La convection joue un rôle central dans la dynamique de l'atmosphère et du climat à toutes les échelles de temps : elle détermine en grande partie la distribution régionale des zones sèches et humides sur Terre, contribue aux transports verticaux et horizontaux à diverses échelles, joue un rôle actif dans la variabilité et la sensibilité du climat, et est la cause de très nombreux aléas. Quoique activement explorée, la physique interne de la convection atmosphérique et son rôle dans les cycles de l'eau et de l'énergie comportent encore énormément de mystères. La structure et le cycle de vie des systèmes convectifs, leur microphysique, leur rôle dans le transport des aérosols et des espèces chimiques, et les couplages qui s'opèrent entre les nuages convectifs et leur environnement proche, la dynamique de grande échelle et la surface, forment un gisement de recherche fondamentale intarissable, que ce soit du point de vue de la modélisation, de l'observation, de la théorie ou de la prévision.

Les incertitudes sur les mécanismes fondamentaux de la convection affectent notre capacité à prévoir les événements météorologiques à fort impact tels que bourrasques, crues, foudre, cyclones tropicaux et tempêtes extratropicales, mais aussi la circulation générale de l'atmosphère et sa variabilité aux échelles saisonnières (moussons) et intra-saisonnières (oscillations de Madden-Julian). De plus, nombre d'interrogations subsistent quant à l'évolution du cycle hydrologique et de ses extrêmes dans un climat qui se réchauffe. En définitive, c'est donc tout l'enjeu de l'adaptation au changement climatique qui s'invite dans le champ thématique de la convection atmosphérique.

Du point de vue de la modélisation, les verrous conceptuels associés à la convection sont à l'origine de biais persistants dans les modèles de circulation générale. L'amélioration du contenu physique des paramétrisations de la convection demeure donc toujours un enjeu pour améliorer les modèles de climat et de prévision du temps. Elle est aussi un moyen de développer des images conceptuelles pertinentes, et de faciliter l'interprétation des limites de prévisibilité du temps et des incertitudes des projections climatiques. L'observation de la convection à toutes les échelles est un enjeu crucial pour identifier les paramètres environnementaux qui déterminent ses caractéristiques et quantifier son impact sur la grande échelle et sur la surface. Une meilleure compréhension et documentation des processus convectifs par les observations est donc indispensable pour appréhender les différentes échelles spatio-temporelles auxquelles la convection s'exprime, et permettre la formulation de modèles conceptuels et/ou théoriques plus uni-

versels, indispensables pour répondre aux enjeux énoncés ci-dessus. De ce point de vue, l'avènement de nouvelles méthodes d'observations, le développement d'instruments innovants, et leur déploiement sur des satellites et sur une variété d'autres vecteurs (avions, ballons, drones) représentent des opportunités extraordinaires pour apporter des informations qui restaient jusque là difficiles d'accès, et donc faire progresser la recherche.

L'étude de la convection atmosphérique n'est pas seulement un enjeu de recherche fondamentale pour la météorologie et le climat. L'avancée des connaissances sur ce processus central de l'atmosphère sera à coup sûr porteuse de progrès dans notre capacité à répondre à de nombreux enjeux sociétaux, particulièrement dans un contexte de changement climatique.

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Pour répondre à ces enjeux, il est nécessaire de renforcer les efforts de recherche autour de quatre grandes questions scientifiques. Ces questions seront d'autant mieux abordées que les stratégies de recherche s'appuieront sur de fortes synergies entre observation, modélisation et théorie, de l'échelle du nuage à l'échelle climatique.

Comment la convection s'organise-t-elle ?

La distribution spatiale des nuages convectifs montre une grande diversité de formes, de motifs et de degrés d'aggrégation, de la méso-échelle (i.e. quelques km à quelques centaines de km), à l'échelle planétaire (e.g. zones de convergence inter-tropicales, oscillations tropicales intra-saisonnières). Les recherches récentes montrent que ces organisations spatiales importent autant pour la météorologie (intensité des pluies, événements extrêmes) que pour le climat et le changement climatique (bilan radiatif, circulations tropicales, modes de variabilité naturelle et mécanismes de rétroaction liés aux nuages et à la vapeur d'eau). Pour améliorer la prévision du temps et du changement climatique, il est donc nécessaire d'améliorer notre compréhension des processus physiques sous-jacents à ces organisations, et leur représentation dans les modèles.

Plus spécifiquement, comment les interactions entre les nuages et leur environnement conditionnent-elles les différentes formes d'organisation, et les transitions de l'une à l'autre ? Quel est le rôle de la surface, des processus de couche limite, des aérosols et de la microphysique des nuages, de la pluie, du rayonnement, du cisaillement et des circulations de méso-échelle dans ces interactions ? Les observations confirment-elles les mécanismes suggé-



Un ballon captif de 7 m³, gonflé à l'hélium emporte des sondes de mesure de paramètres météorologiques, disposés le long de sa ligne d'attache selon une répartition logarithmique. Le ballon est ensuite emmené à une altitude adaptée à l'objectif scientifique déterminé lors du briefing de la veille.

La campagne BLLAST (Boundary Layer Later Afternoon and Sunset Turbulence) coordonnée par le LAERO s'est déroulée au Centre de Recherches Atmosphériques (Hautes-Pyrénées) afin de mieux comprendre la transition jour-nuit de la première couche d'atmosphère. Pendant la transition de fin d'après-midi, elle passe d'un régime de convection et de mélange turbulent à un régime stable.

rés par les études théoriques ou de modélisation dans des cadres idéalisés? Les organisations convectives simulées par les modèles de méso-échelle sont-elles réalistes et se produisent-elles pour les bonnes raisons? Faut-il paramétrer l'organisation à méso-échelle de la convection dans les modèles de climat et si oui comment?

Comment la convection contribue-t-elle aux transports et circulations atmosphériques?

La convection est un acteur fondamental du transport vertical des masses d'air, des basses couches de l'atmosphère à la haute troposphère et la basse stratosphère. Elle redistribue ainsi les aérosols, les espèces chimiques et les gaz à effet de serre (CO et CO₂). La production d'éclairs lors des orages est une source importante de NO_x, et les nuages convectifs sont le siège de réactions chimiques en phase aqueuse qui modifient la composition chimique de la haute atmosphère (ozone, ammoniac) (voir aussi Défi « Anthropisation et pollutions », aire prioritaire tropicale). Par la turbulence et les rafales de vent qu'elle provoque, la convection participe fortement au soulèvement de poussières par érosion éolienne, et contribue au transport et au lessivage de l'atmosphère par précipitation. Les changements de phase à l'intérieur des nuages constituent une source majeure de chauffage diabatique de l'atmosphère qui, ajoutés

au transport de quantité de mouvement par la convection, interagissent avec les circulations atmosphériques à toutes les échelles. Enfin, les ondes de gravité générées par la convection influencent la variabilité de la stratosphère (e.g. l'oscillation quasi-biennale).

Toutefois, ces transports nécessitent d'être mieux quantifiés: peut-on contraindre par les observations les flux de masse à l'intérieur des nuages convectifs? les NO_x ou les aérosols dans la haute atmosphère? l'intensité des vents au niveau des fronts de rafale? les quantités de poussières émises et transportées par les systèmes convectifs, y compris les particules 'géantes' observées à grande distance des sources? la quantité de vapeur d'eau injectée dans la stratosphère par les *overshoots*? l'impact de la pyroconvection induite par les méga feux sur le transport de matière jusque dans la stratosphère? Du point de vue de la dynamique atmosphérique: Comment la convection influence-t-elle la structure verticale des circulations de grande échelle? les

dépansions extra-tropicales? les rafales de vent près de la surface? les transports inter-hémisphériques?

Comment expliquer et prévoir les événements extrêmes liés à la convection ?

Peu de processus atmosphériques sont responsables d'autant de phénomènes extrêmes: rafales de vent, pluies intenses, grêle, inondations, foudre, tempêtes, cyclones tropicaux, etc. Malheureusement, la prévision de ces phénomènes reste difficile. Pour l'améliorer, il est nécessaire de progresser à la fois dans la compréhension physique des phénomènes, leur représentation dans les modèles de prévision du temps et du climat, et l'utilisation et l'assimilation des observations en temps réel.

Les efforts doivent porter notamment sur le rôle dans la production d'éclairs de la microphysique (glace, aérosols) et des vitesses verticales dans les nuages convectifs, sur la compréhension des facteurs influençant la vitesse de propagation des systèmes convectifs, sur les processus conduisant à l'intensification rapide des cyclones tropicaux (notamment grâce à une meilleure représentation des échanges air-mer en condition de vent fort), à la formation de cyclones en zone Méditerranéenne (*medicanes*), les interactions entre les cyclones et la houle, le rôle des structures de méso-échelle dans la génération des rafales de vents extrêmes, le rôle de l'organisation de la convection dans les précipitations intenses. Des progrès seront aussi nécessaires dans l'exploitation des nouvelles observations spatiales pour la prévision immédiate, les systèmes d'alerte, l'initialisation des modèles de prévision, l'identification des sources de prévisibilité dans les ondes tropicales, et l'élaboration de narratifs ('*storylines*') sur les conditions d'occurrence des phénomènes à fort impact. Enfin, les études de 'paléo-tempéologie' permises notamment par les *proxies* (isotopiques et autres) seront une opportunité pour mieux comprendre la dépendance des événements extrêmes au climat moyen.

Comment évolue la convection dans un climat qui change, avec quelles conséquences ?

Alors que le climat se réchauffe, le besoin d'anticiper la réponse de la convection atmosphérique à l'augmentation de la température globale se fait de plus en plus pressant. Cela est nécessaire en effet pour anticiper l'évolution de la distribution des zones sèches et humides à la surface de la Terre, des événements à fort impact, mais aussi les mécanismes de rétroaction climatique liés aux nuages et à la vapeur d'eau.

Pour cela, il est nécessaire de maintenir et d'analyser les longues séries d'observations de la convection (satellites, réseaux de surface, proxies paléo-climatologiques, etc), de comprendre les processus physiques par lesquels la température moyenne de la Terre influence la convection (Change-

ments de stabilité statique et effet d'iris des nuages hauts? Changement d'agrégation de la convection? Changement de l'intensité des pluies?). Comment la morphologie des systèmes convectifs évolue-t-elle, et quel impact cela a-t-il sur la foudre et l'évolution de la fréquence des feux? En retour, comment la convection répond-t-elle aux méga feux? (e.g. pyroconvection, interaction de la convection avec les rivières de fumée provoquées par les feux de forêt). Il est important d'analyser également les expériences de réchauffement global qui sont réalisées par une hiérarchie de modèles numériques allant des modèles de circulation générale de type CMIP aux modèles globaux résolvant explicitement la convection profonde, afin de mieux identifier les réponses robustes. Enfin, pour rendre les projections climatiques plus crédibles, il importe de continuer à améliorer la physique des modèles de climat, notamment leurs paramétrisations de la convection et des autres processus étroitement couplés (microphysique, couche limite, nuages et rayonnement), et de tester les modèles sur des cas de changements climatiques paléo à l'aide de reconstructions des climats passés.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

Notre communauté est héritière d'un grand savoir-faire et d'une expertise internationalement reconnue en matière de modélisation et d'observation de la convection. L'une de ses forces est sa structuration au niveau national (infrastructures nationales de recherche, Groupements de Recherche, Programmes et Équipements Prioritaires de Recherche) qui a aidé notamment à renforcer les interactions entre météorologie et climat, avec des développements conjoints.

S'agissant de l'observation des phénomènes convectifs par les satellites, c'est littéralement une nouvelle ère qui s'ouvre. Le lancement d'une nouvelle génération de satellites géostationnaires permettra bientôt une analyse plus précise et plus complète des nuages convectifs (e.g. cycle de vie, organisation spatiale, électricité atmosphérique). Les missions internationales EarthCARE et AOS (dont C2OMODO), C3IEL/INCUS, HARMONY ou encore Post-EPS, permettront de scruter la structure interne des systèmes convectifs (notamment les vitesses verticales) dans divers environnements, et à des résolutions comparables à celles de la nouvelle génération de modèles à fine résolution (hectométrique à kilométrique). Forte de son expérience des missions passées (A-Train, GPM ou encore Megha-Tropiques) qui a appris à exploiter les complémentarités instrumentales, la communauté française s'est largement investie dans le développement des nouveaux concepts et la préparation de ces nouvelles missions dont les lancements sont prévus vers la fin de la décennie 2020. Elle participera donc activement à leur exploitation scientifique.

Ces dernières années ont vu la mise à disposition de longues séries temporelles issues de sites d'observations ou de missions spatiales, et de nouveaux produits orientés vers

les processus convectifs. Ces données sont une force pour de nombreuses études de la convection.

De nouvelles opportunités apparaissent pour l'observation, avec le développement d'une grande diversité de systèmes d'observation plus ou moins autonomes (drones, aéroclippers, bouées ou ballons par exemple), et le développement de techniques d'échantillonnage novatrices (e.g. vol adaptatif de drones, ballons manoeuvrables, mesures stéréoscopiques, télédétection à l'horizontale). Cette nouvelle génération d'observations fournira des informations dans des régions jusqu'alors inaccessibles, comme très près de la surface ou des tours convectives, dans les cœurs des cy-

clones, dans les nuages de pyroconvection ou au-dessus des systèmes convectifs par exemple.

L'augmentation des moyens de calculs (super-calculateurs, GPU) rend désormais possible les simulations numériques sur des domaines de plus en plus grands (jusqu'à l'échelle globale pour la convection profonde) dans lesquelles la convection est représentée de manière explicite. Cela constitue une opportunité extraordinaire pour comprendre les interactions de la convection avec la méso-échelle et la grande échelle, ainsi que l'organisation de la convection. Toutefois, les avancées dans la modélisation de la convection ne peuvent pas se limiter à l'augmentation de la réso-

LES ENJEUX DE LA PALÉO

La conjonction de la rédaction du livre blanc « Paléoclimats & Paléoenvironnements » (2021-2023) avec cette prospective OA a permis de souligner l'importance des enregistrements des climats et environnements passés dans les archives océaniques et glaciaires (et continentales) pour explorer les impacts et les rétroactions de différentes perturbations (forçages) climatiques, biologiques voire géodynamiques au cours des temps géologiques.

Ces recherches s'appuient sur des réseaux très structurants qui relèvent de différentes infrastructures de soutien telles que les flottes nationales et grands carottages (IR FOF), les stations polaires (IR Concordia et IPEV), et internationales (TGIR ECORD/IODP), IR RéGEF pour les analyses géochimiques, la modélisation (IR CLIMERI) et des bases de données diverses. Sur ces différents aspects, la communauté OA a un rôle important, et contribue par son approche intégrative des longues échelles de temps, d'états climatiques contrastés, et du préindustriel, aux six défis identifiés par cette prospective. L'activité est fortement impliquée au niveau international que ce soit pour l'acquisition de données (e.g. missions internationales de forages, etc.) ou la modélisation (e.g. coordination du Paleoclimate Modeling Intercomparison Project). Ces recherches apportent des éclairages essentiels aux synthèses internationales publiées dans les rapports du GIEC, mais contribuent pour l'instant assez peu aux rapports de synthèse axés sur le vivant de l'IPBES. Ces travaux apportent des éclairages sur les grands enjeux actuels liés aux objectifs du développement durable.

Cinq grandes thématiques ont été identifiées, et s'inscrivent dans la continuité des inflexions des dernières années sur (1) le fonctionnement du climat, et de ses réponses à des forçages externes ou aux rétroactions internes, sont au cœur des activités OA; (2) l'impact des processus géologiques internes et de surface, et de leurs rétroactions, sur

le climat et les paléoenvironnements; (3) les grands cycles biogéochimiques dont celui du carbone; (4) l'évolution des écosystèmes et l'intégration de la complexité biologique; (5) les interactions entre les humains et leur environnement.

Le projet porté par le livre blanc suit 3 axes scientifiques principaux, et permettra d'aborder les fonctionnements, les questions de vulnérabilité et résilience, et les effets croisés entre société humaine et climat, du temps long au récent sur (1) la compréhension et l'intégration des processus couplés climat-environnement (Fonctionnement du Système Terre; Caractérisation du spectre de la variabilité climatique; Compréhension du rôle/réponse des forçages lents et rapides; caractérisation du cycle de l'eau et de ses variations); (2) les forçages biotiques et abiotiques et seuils sur l'évolution des écosystèmes (Compréhension du cycle du carbone et des cycles biogéochimiques dans le passé; Réponses et rétroactions des écosystèmes affectant les caractéristiques du climat ou de l'environnement; Evolution des écosystèmes; Crises environnementales) et enfin (3) des liens Humain-Climat-Eco(socio)systèmes (Interactions humains/milieu; Aléas et risques).

Ces nouvelles directions de recherche favorisent des aller-retours entre échelle locale et planétaire, ou des approches plus systémiques des fonctionnements et des interactions à l'échelle d'un territoire ou d'une région au sens large. Ces approches sont essentielles pour remettre la période instrumentale dans le contexte d'un fonctionnement du système Terre avec sa propre inertie et des temps de réponse des ses différents compartiments comme l'atmosphère, l'océan et la cryosphère. Une approche de plus en plus fine du système est également proposée, ce qui demande de relever de nombreux défis scientifiques et méthodologiques pour y parvenir avec en particulier les besoins (i) de mieux comprendre l'élaboration des traceurs et des proxies, des processus d'enregistrement puis de préservation du signal dans les archives environnementales;

lution et doivent être associées à des améliorations de la représentation des processus physiques. Il est donc nécessaire de continuer à progresser sur le développement de paramétrisations sous-maillages, en tirant parti des nouvelles observations (y compris isotopiques) et des nouvelles simulations explicites. Notre communauté est riche d'un grand savoir-faire dans ce domaine.

Les nouvelles techniques d'apprentissage machine, basées sur des statistiques ou sur l'intelligence artificielle, constituent une opportunité incontournable dans les années à venir, que ce soit pour l'extraction d'informations des observations (des mesures *in situ* aux mesures satellite) ou

des simulations numériques. Ces techniques ouvrent aussi de nouvelles perspectives pour le développement de paramétrisations de la convection, ainsi que la calibration des modèles. Ces techniques nécessitent une interaction forte entre science des données et physique, que notre communauté a déjà commencé à développer.

Les questions scientifiques identifiées ci-dessus s'intègrent parfaitement dans plusieurs initiatives du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (GEWEX GASS notamment).

(ii) *d'élargir la résolution spatiale et temporelle des archives paléoclimatiques et paléoenvironnementales* notamment dans les régions insuffisamment documentées, en particulier dans la zone intertropicale (océan Indo-Pacifique) et l'océan austral par des campagnes d'échantillonnages fédératrices ambitieuses (forages glaciaires et campagnes en mer); (iii) *d'améliorer des chronomètres absolus et relatifs* (iv) *relier les études sur les analogues actuels à celles des environnements et climats passés en exploitant mieux les nouvelles approches en paléogénomique* notamment; (v) *définir de nouveaux indicateurs des activités humaines* pour mieux comprendre l'évolution des sociétés humaines en lien avec les changements environnementaux et l'impact des sociétés sur l'environnement (milieux et climat), en forte interaction avec les sciences humaines; (vi) *mieux caractériser les événements extrêmes passés* et prendre en compte l'hétérogénéité des temps d'émergence de la signature anthropique selon les systèmes (tropicaux et polaires par exemple); (vii) et finalement *mieux distinguer les perturbations transitoires et les seuils d'hystérésis* pour différents systèmes ou sous-systèmes.

Ces éléments vont de pair avec les développements d'approches permettant de disposer d'observations sur le terrain pour une meilleure compréhension des systèmes actuels et des conditions environnementales naturelles afin de mieux développer et calibrer les traceurs et proxys et prolonger vers le passé les séries temporelles d'observations directes avec un maximum de cohérence, en se calquant sur les SNOs / ZA par exemple. Le développement de nouvelles approches de modélisations numériques ou analogiques permettra d'intégrer les processus élémentaires physiques, chimiques et biologiques contrôlant la dynamique des paléoclimats et paléoenvironnements aux différentes échelles de temps et d'espaces, notamment pour mieux identifier les processus élémentaires pertinents et leur rôle dans les mécanismes globaux (cf numérique & modélisation). Le renforcement du lien modèle - données permettra de mieux contraindre les processus à la base de certains biais

importants et résistants dans les modèles (i.e. bilan énergétique, sensibilité et variabilité climatique, cycle hydrologique, circulation océanique, forçages et rétroactions des calottes, végétation, sol, cycles biogéochimiques, ...). L'intégration d'informations ponctuelles via des approches statistiques (type Intelligence Artificielle) pour obtenir des reconstructions cohérentes d'un point de vue physique ou biogéochimique qui pourront être directement comparées aux sorties de modèles du système climatique. Pour cela il est essentiel d'harmoniser les méthodes et formats des données (traceurs climatiques, de datation, paléo-végétation, niveau marin, etc.) archivées dans les grandes bases de données telles que DataTerra, PAGES, PANGAEA, etc. Le développement des approches couplant mathématiques, physique et calcul haute performance pour optimiser l'assimilation des proxys dans les modèles de système Terre. Le renforcement des liens modèle-données passe aussi par l'intégration des traceurs géochimiques et la complexité biologique dans les modèles et par la réalisation de simulations transitoires longues.

Parmi les inflexions majeures on peut aussi noter la volonté de mettre l'accent sur les sur la saisonnalité et les variabilités à court terme dans toutes les périodes, avoir une approche multifactorielle des changements régionaux et d'avoir recours de façon plus systématique à la modélisation des proxys (isotopes, traceurs, surface, coraux etc.). Les comparaisons modèles données vont aussi faire face à de nouveaux paradigmes avec la montée en puissance de simulations transitoires longues, avec des simulations de type dernière déglaciation identifiées comme une référence représentative couvrant par exemple une déglaciation complète.

Le livre blanc propose la mise en place d'une coordination nationale pour la collecte, l'archivage, la gestion et l'exploitation des échantillons et des données paléo, voire d'un conservatoire national paléo respectant les principes FAIR.

Comme on le voit notre communauté dispose d'un grand nombre de forces et d'atouts pour aborder ce qu'il convient d'appeler 'la décennie de la convection'. Malgré tout, des points faibles restent à corriger. Les recommandations suivantes visent à y contribuer.

RECOMMANDATIONS

Ce travail de synthèse a permis d'identifier des questions de recherche pertinentes pour les enjeux sociétaux et stimulantes scientifiquement, pour lesquelles la communauté française est bien positionnée pour y répondre. Toutefois, il faudra pour cela remédier à certaines faiblesses. Les recommandations suivantes visent à y parvenir.

Favoriser les interactions

La volonté de rencontres régulières (e.g. tous les 18 mois) de notre communauté élargie est très clairement exprimée. Ces rencontres permettraient de partager les approches et les expertises, et l'émergence de nouvelles initiatives collectives autour des 4 questions scientifiques présentées ci-dessus. Le CNRS-INSU a par le passé soutenu ce type d'activités au travers de ses programmes nationaux. L'instrument aujourd'hui prôné est le Groupement De Recherche, mais il revêt une certaine lourdeur administrative. Faut-il envisager une modification des missions du LEFE pour permettre des actions pérennes d'animation ?

Encourager les campagnes sur la convection coordonnées aux niveaux national et international :

- Les campagnes de terrain sont de formidables moyens de fédérer une communauté, d'exploiter les opportunités en matière d'observation (sol, aéroportées, ballons, satellites) et de modélisation, et de favoriser les synergies autour de l'étude des processus et de leurs impacts. De telles actions ont montré leur efficacité dans le passé (e.g. campagnes AMMA, HyMeX ou EUREC4A) et des initiatives ambitieuses sont envisageables dans les prochaines années, y compris dans un cadre international (e.g. GPEX, soutenue par le WCRP).
- Des synergies émergeraient facilement autour de régions telles que l'Atlantique Tropical (organisation de la convection au-dessus des océans, transport, poussières), le Brésil (cycle diurne, interaction convection/chimie/UTLS), le continent Maritime ou l'océan Indien (interaction île/convection, organisation de la convection, cyclones).
- Faciliter les coordinations pluri-organismes pour réduire le nombre de guichets de financements et faciliter l'organisation de petites campagnes pour tester de nouveaux instruments.
- Envisager la mise en place de conventions de collaborations avec des partenaires internationaux pour étendre la capacité de mesure et valoriser les données de campagnes.

Maintenir et consolider l'existant

Notre communauté ne pourra se saisir des opportunités à venir que si elle est dotée d'une masse critique pour le faire. Les moyens humains sont d'une importance cruciale. Il faut veiller à conserver l'ensemble des expertises (analyses, développement instrumental et développement de modèles), et à recruter davantage de chercheurs et d'ITA sur cette thématique. Enfin, combler les expertises manquantes (e.g. « théorie » de la convection, électronique numérique) et soutenir l'expertise technique dans les laboratoires reste nécessaire.

Organiser plus efficacement

Il existe une forte volonté pour une plus grande mutualisation des jeux de données. De gros efforts sont déjà en cours pour les observations ou les simulations des modèles de grande échelle. Le partage (voire la conception) de simulations à fine échelle (CRM ou LES) est plus nouveau. Leur mise à disposition est à discuter avec les pôles de données.

Responsabilité environnementale: Pour réduire le coût carbone de notre recherche :

Inciter le plus possible à la coordination (campagnes, simulations) pour que nos activités bénéficient à la communauté la plus large possible et soient valorisées au maximum. Encourager aussi la documentation et la distribution des jeux de données produits, par exemple en associant la production des jeux de données à l'écriture d'un *data paper*.

Défi « Diversité du vivant et biogéochimie »

Le vivant est omniprésent dans l'ensemble des compartiments du système Terre et en influence, voire pilote, leur trajectoire. Parmi les processus qui impactent significativement l'évolution du climat de la Terre et qu'il est urgent de caractériser et de quantifier, on compte la pompe biologique qui repose en grande partie sur les micro-organismes mais aussi sur l'ensemble de la chaîne trophique.

Les micro-organismes sont impliqués dans les cycles biogéochimiques dans tous les environnements de la Terre. Comprendre le rôle spécifique des micro-organismes dans le cycle de certains éléments et l'impact du changement global sur le lien entre vivant et biogéochimie reste un enjeu majeur. À l'ère des données massives (e.g. séquençage et imagerie haut débit...), l'acquisition de données à hautes résolutions spatio-temporelles à travers des flotteurs, planeurs et satellites, et de l'intelligence artificielle, ouvre de nouvelles pistes pour répondre à ce défi. Un enjeu clef est de profiter de ces nouvelles technologies pour une compréhension plus mécaniste des connexions entre les micro-organismes et les éléments géochimiques, et ceci dans l'océan et l'atmosphère en lien avec les surfaces continentales. L'ensemble des approches aujourd'hui disponibles, couvrant différentes échelles (du « single-cell » à la communauté; du régional au global), la construction de réseaux métaboliques et la modélisation devraient permettre des avancées importantes dans les années à venir.

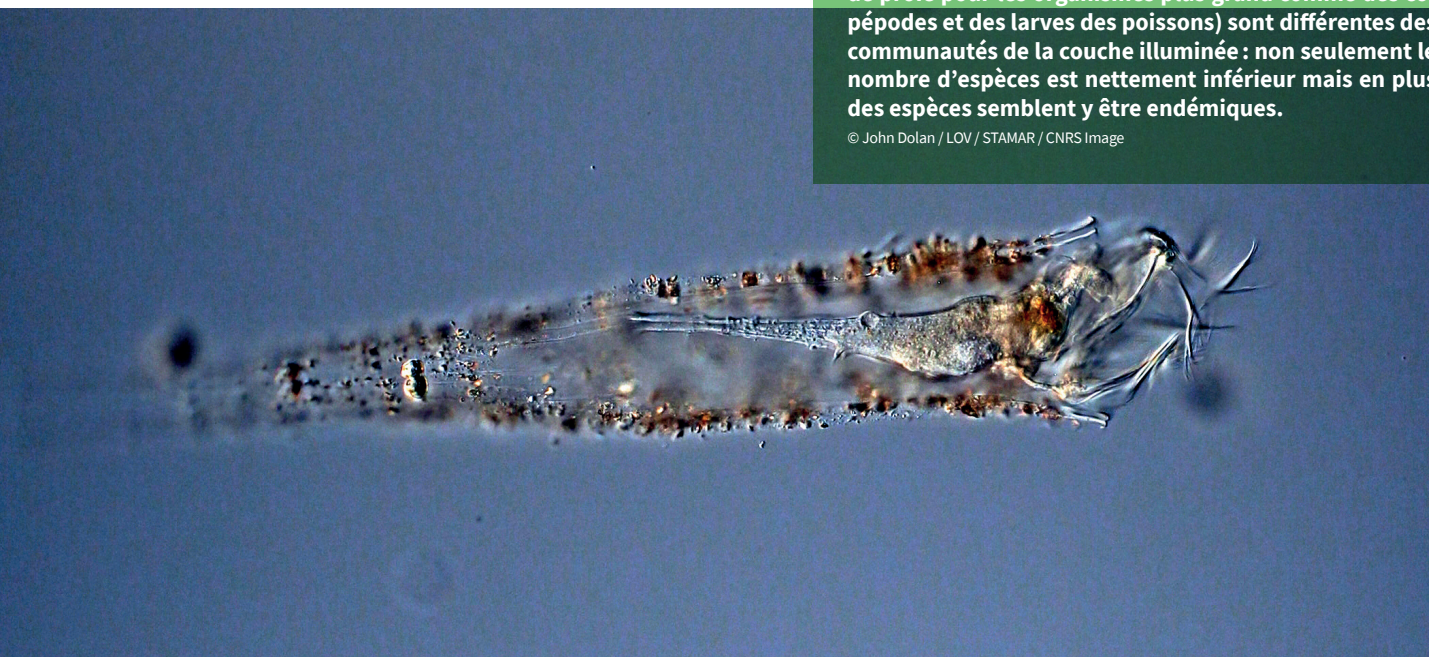
LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Les pompes à carbone : quels sont les processus déterminants pour mieux contraindre les bilans globaux ?

La zone mésopélagique (200-1000 m) joue un rôle majeur dans la séquestration à long terme du puits de CO₂ atmosphérique. Malgré les nombreuses observations autour de la **pompe biologique à carbone**, certains processus restent encore peu connus, notamment au-delà de la couche éclairée des océans où les processus de reminéralisation du carbone exporté de la surface des océans restent mal contraints pour comprendre et estimer correctement la part du carbone séquestré. De plus, la **pompe microbienne à carbone** qui consiste dans la production de la matière or-

La zone mésopélagique s'étend entre 200 et 400 m de profondeur. C'est une zone de pénombre entre la couche illuminée de surface et l'obscurité totale des grandes profondeurs. Les organismes qui y habitent sont très méconnus. Au Laboratoire d'Océanographie de Villefranche-sur-Mer, des échantillons prisent dans le mésopélagique peuvent être examinés ensuite à terre au laboratoire en quelques minutes. Ce qui a permis l'observation de *Daturella statura*, un cilié tintinnide de 200 µm de longueur, la cellule vit dans sa coquille, ou lorica, couvertes des particules détritiques. Les communautés mésopélagiques du microzooplancton (qui sert de proie pour les organismes plus grand comme des copépodes et des larves des poissons) sont différentes des communautés de la couche illuminée : non seulement le nombre d'espèces est nettement inférieur mais en plus des espèces semblent y être endémiques.

© John Dolan / LOV / STAMAR / CNRS Image



ganique dissoute par les procaryotes non-phototrophes est encore mal quantifiée. Il importe de mieux caractériser la biodisponibilité de la matière produite par la pompe microbienne afin de comprendre son impact sur la séquestration de carbone et les interactions entre pompe biologique à carbone et pompe microbienne. De même, les procaryotes chimiolithotrophes qui peuvent acquérir leur énergie par l'oxydation de composés inorganiques pourraient jouer un rôle important dans l'écart apparent entre la quantité de carbone organique produite par photosynthèse transférée vers l'océan profond et la demande métabolique en carbone en zone mésopélagique. Le rôle et la composition des communautés microbiennes impliqués dans les deux pompes à carbone doivent être mieux compris. La zone mésopélagique constitue également le théâtre d'une des plus grandes migrations animales (micronecton et zooplancton) observée sur la planète, mais qui reste très mal quantifiée. Un effort de recherche doit être réalisé pour comprendre quels sont les impacts des migrations verticales sur l'efficacité de la pompe biologique du carbone. Des processus abiotiques qui transforment l'intégrité physique de la matière qui coule entre la surface et la zone mésopélagique des océans tels que la fragmentation, la réduction du taux de chute, et le reconditionnement des particules devraient également avoir un impact sur l'efficacité de la séquestration du carbone.

Des micro-organismes et métabolismes émergents

Outre les micro-organismes phototrophes (capables de croître uniquement avec de la lumière et des composés inorganiques) et hétérotrophes (capables de croître uniquement avec de la matière organique), il est maintenant évident que de nombreux taxons microbiens sont mixotrophes (à la fois autotrophes et hétérotrophes) et que leur versatilité trophique présente des implications biogéochimiques fortes qui sont toutefois peu connues. Afin de mieux comprendre les conséquences de la mixotrophie dans les flux des éléments des réseaux trophiques, il est fondamental d'identifier ces micro-organismes et de connaître les facteurs abiotiques qui mènent à ce métabolisme.

Par ailleurs, le séquençage a détecté au cours de la dernière décennie des champignons saprophytes (capables d'utiliser la matière organique comme source d'énergie) dans tous les océans du monde. Or, il est connu que, dans les sols et possiblement dans les milieux aquatiques d'eau douce, les champignons (Fungi) sont responsables de la dégradation et de la reminéralisation d'une grande fraction du carbone organique (notamment des molécules les plus complexes). Considérant, les possibilités du transfert vers l'océan de Fungi par voie atmosphérique et fluviale, ils pourraient jouer un rôle important dans le lien entre les écosystèmes. De nouvelles techniques d'analyse permettent de détecter et de quantifier les bioaérosols. Combinée à des prélèvements mis en culture, il sera ainsi possible de cartographier

les abondances et les taxons mis en jeu de façon à en identifier les sources et les processus d'émission, pour à terme évaluer les éventuels impacts écologiques et sanitaires. En milieu marin, leur rôle fonctionnel dans leur écosystème demeure très lacunaire et nécessite une attention accrue par la communauté OA.

L'importance des virus dans le fonctionnement des écosystèmes marins est désormais évidente. Ils sont aujourd'hui identifiés comme les entités biologiques les plus abondantes dans l'océan et présentent des implications biogéochimiques majeures *via* la mortalité de leurs hôtes microbiens et la reprogrammation métabolique au cours de l'infection. Les connaissances actuelles restent essentiellement théoriques. L'importance et la dynamique de l'infection virale et le devenir métabolique/ biogéochimique des micro-organismes infectés restent mal quantifiés, particulièrement dans les écosystèmes marins profonds. Mieux contraindre ces processus est aujourd'hui essentiel pour comprendre le rôle du compartiment viral dans les flux de séquestration du carbone.

À l'interface terrestre et biogéochimie, la distribution et diversité des bioaérosols (eucaryotes microbiens, bactéries, archées, virus) peut affecter les processus de nucléation des nuages ayant un effet sur le climat (via l'impact radiatif) et la pollution de l'air, mais aussi transporter des agents pathogènes et micro-organismes. Grâce à la détection, analyse et mise en culture de bioaérosols, il sera ainsi possible de cartographier les abondances et les taxons mis en jeu de façon à en identifier les sources et les processus d'émission, et à terme évaluer les éventuels impacts écologiques et sanitaires. La composition des communautés microbiennes dans l'atmosphère reste une question qui intéresse de plus en plus la communauté atmosphérique, notamment dans les nuages, pour étudier les sources, le transport et la transformation de la matière organique dissoute dans l'atmosphère.

L'impact des processus à fine-échelle sur les cycles biogéochimiques

Reposant sur des champs disciplinaires disjoints, la dynamique océanique et la (micro-)biologie marine ont longtemps été considérées de manière totalement découplées mais il devient aujourd'hui évident que des couplages significatifs existent et nécessitent d'être mieux pris en compte pour les études en biogéochimie, à la fois dans les bilans et dans les modélisations.

L'instabilité des fluides crée, en effet, des structures dynamiques à fine échelle (10-100 km et jours/semaines) telles que des filaments, des fronts, des méandres ou des tourbillons qui impactent localement la composition (oxygène, salinité, distribution des nutriments) et les paramètres physiques (température) de l'océan. Alors que la résolution des paramètres chimiques et physiques a notoirement

augmenté, les paramètres biologiques tels que les activités métaboliques ou la quantification des abondances et de la diversité des micro-organismes fonctionnellement pertinents restent un défi technologique désormais accessible. Les mesures biologiques à haute résolution permettront d'intégrer les processus liant l'instabilité des fluides aux flux biogéochimiques à l'échelle fine, puis à l'échelle régionale et globale grâce à des méthodes de modélisation et d'apprentissage automatique.

La connectivité aux interfaces océan/atmosphère/continent et ses impacts sur les cycles biogéochimiques

L'interface océan/atmosphère est le siège d'émissions gazeuses et particulaires vers l'atmosphère. Outre la composante saline qui est bien connue, il est maintenant admis que les émissions océaniques comportent une composante biologique, qui inclut des organismes vivants et/ou des composés produits par l'activité biologique marine. Il importe de les identifier et de les quantifier en lien avec le milieu qui les produit. Il s'agit, notamment, de décrire leurs propriétés en tant que noyaux de condensation nuageuse et leur contribution à la formation et la composition chimique des nuages en milieu éloigné d'autres sources de particules. L'enjeu est de déterminer si les processus impliquant des organismes vivants sont concurrentiels vis-à-vis des processus physiques et chimiques « classiques ».

À l'interface continent/océan, l'activité hydrothermale sous-marine libère de fortes concentrations en matières organiques et inorganiques et en métaux traces, qui peuvent être dispersés sur de grandes distances. Ces émissions de fluides hydrothermaux peuvent agir comme des inhibiteurs ou des promoteurs de l'activité biologique, en fonction de la tolérance et des limites des différents micro-organismes et de la dilution des fluides avec l'eau de mer environnante. L'étude des sources hydrothermales profondes et peu profondes et de leurs impacts sur les cycles biogéochimiques, abondantes mais peu étudiées, apparaît comme une priorité pour la communauté OA française, qui s'insère dans les axes du PPR Grands Fonds.

Aux interfaces continent/atmosphère/océan, les aérosols terrigènes émis par l'érosion éolienne des sols arides constituent des apports significatifs d'éléments, notamment de fer aux écosystèmes marins, accélérant voire déclenchant la production biologique mais aussi ayant un effet de lestage sur l'export de la matière organique vers l'océan profond. Cela nécessite de mieux comprendre le rôle du vivant aux différentes étapes de ce processus. D'une manière générale, les aérosols agissent comme vecteur de transport de micro-organismes à longue distance.

Dans le continuum (sol/mer)-plante-atmosphère, pour établir des bilans (saisonniers à annuels / locaux à régionaux) et mieux comprendre le cycle biogéochimique de

l'azote, il est nécessaire d'étudier les processus dans les milieux : quelles sont les communautés microbiennes impliquées dans la nitrification et dénitrification ; comment ces communautés sont-elles sensibles aux changements de dépôt atmosphérique des composés azotés ; quelles sont les rétroactions des émissions vers l'atmosphère. Au-delà des composés d'origine naturelle, les matériaux issus de la combustion de biomasse (forêts et combustibles fossiles) peuvent perturber les écosystèmes par le dépôt d'aérosols, source de nutriments pour les micro-organismes, de contaminants ou de matières retenant les nutriments, comme le carbone suie.

Impact du changement climatique sur les interactions et rétroactions micro-organismes-cycles biogéochimiques

La composition et le rôle des communautés microbiennes dans les processus couplés physique-chimie-biologie à l'origine des flux de matière dans l'océan, l'atmosphère et aux interfaces, sont tributaires de facteurs de stress tels que la température, l'humidité, l'acidification, le type d'usage des sols, ou les contaminants. L'identification de ces facteurs dans un environnement donné peut permettre de déterminer la trajectoire future des éléments dans le contexte actuel de changement climatique.

Le transfert de méthane océanique vers l'atmosphère dans le cadre du changement climatique reste difficilement prévisible. La capacité de la colonne d'eau à limiter le transfert de méthane depuis les sédiments vers l'atmosphère, la contribution réelle des zones océaniques et côtières, des sources microbiennes et éventuellement thermogéniques au bilan atmosphérique du méthane, et les méthodes d'observation pour les flux de carbone de faible intensité à l'interface air-mer, sont autant de questions encore ouvertes.

En plus de la matière organique, les micro-organismes calcifiants jouent un rôle clé dans la pompe de carbonates de calcium. La dissolution des carbonates sédimentés représente le principal puits de CO₂ atmosphérique sur des échelles de temps de l'ordre du millénaire. Quels processus contraignent la production des organismes calcifiants ? quelle est la vitesse à laquelle précipitent-ils et sous quelles formes ? Quelles sont les conditions dans lesquelles ils sont dissous, en particulier dans la zone mésopélagique ? Ces questions devront faire l'objet d'approches couplant développements technologiques, observation *in situ* lors de campagnes interdisciplinaires, expérimentation en microcosme/mésocosme, et reconstructions paléoenvironnementales.

Le carbone organique libéré par la dégradation du pergélisol est minéralisé par des microorganismes et libéré sous forme de gaz à effet de serre, alimentant ainsi une boucle positive du réchauffement climatique. Élucider les processus microbiens contrôlant l'ampleur, la vitesse et la dynamique saisonnière des émissions de gaz à effet de serre quelle que

soit la zone géographique, où les processus ne sont pas limités par la température, est une de priorités. De façon plus générale, mieux appréhender les processus de production et de consommation du méthane par les micro-organismes dans les différents écosystèmes aquatiques (marécages, tourbières, lacs, étangs, réservoirs, rivières...), l'impact de la dynamique de ces systèmes et les rétroactions possibles avec le changement climatique est nécessaire pour prendre en compte la totalité du cycle du méthane dans les modèles et les projections futures.

À l'interface terre-mer, la modification du débit des fleuves (nette augmentation en zone polaire, diminution en zone tempérée) entraîne une modification des exports de carbone et de nutriments vers la frange littorale et une modification des réseaux trophiques limniques, littoraux et marins ainsi que des services écosystémiques associés. L'augmentation du volume des apports de contaminants induit par le dégel du pergélisol et la fonte des glaciers pourrait conduire à une exposition accrue des organismes marins, notamment ceux situés en fin de chaîne alimentaire comme les mammifères et les oiseaux du fait des processus de bioamplification et bioaccumulation.

RECOMMANDATIONS

À terre comme en mer (et sur le continuum), l'augmentation des épisodes de perturbation (orages, vagues de chaleur) impactent l'écologie des organismes. La résilience, résistance et adaptation des communautés microbiennes à des conditions extrêmes ou en perturbation continue nécessite

une compréhension accrue pour comprendre les effets sur les flux d'éléments chimiques et sur les écosystèmes, leur réversibilité et les points de bascule (voir défis « variabilité, tendance et points de bascule » ; « événements extrêmes »). À ceci s'ajoute l'impact anthropique des contaminants tels que les micro-plastiques dans l'océan, les virus et bactéries dans l'atmosphère. Dans l'océan profond, une meilleure compréhension de l'impact des fluides hydrothermaux pourrait également nous permettre de mieux comprendre les risques liés à l'exploitation minière potentielle qui fait l'objet d'une forte demande sociétale. L'approche combinée environnement société apparaît de plus en plus prégnante à travers les sciences de la durabilité, pour évaluer la vulnérabilité des écosystèmes et des populations. Le maintien et évolution des Infrastructures de Recherche et des Services Nationaux d'Observations sont cruciaux pour relever ces défis et obtenir des séries saisonnières pour pouvoir suivre les changements, notamment dans des hot spots (zones polaires, tropicales, côtières, profondes).

Dans le futur, l'importance de la biologie dans les systèmes d'observation intégrés de l'océan, du littoral, jusqu'aux régions hauturières mais également dans la surveillance des masses d'air, des nuages et des flux de composés entre surfaces et atmosphère apparaît comme une nécessité pour une compréhension intégrée des processus. Ces nouvelles observations doivent apporter des informations précieuses pour l'étude de processus biogéochimiques majeurs. Ces derniers mettent en jeu les interactions biologiques pour l'évaluation des flux de composés aux interfaces, indicateurs du suivi de l'état de santé des écosystèmes.

Défi « Anthropisation des milieux & pollutions »

LES ENJEUX

L'anthropisation des milieux et les pollutions atmosphériques et océaniques ont de nombreux impacts, écologiques sur les écosystèmes terrestres et marins (biodiversité, productivité marine), socio-économiques ou sur la santé humaine. La diversité et combinaison de polluants émis dans l'atmosphère, l'océan et les écosystèmes terrestres –des gaz, aérosols, contaminants aux plastiques– rend l'analyse de leurs effets complexes. L'anthropisation affecte notamment la qualité de l'air des zones urbaines, via la pollution atmosphérique (particules fines, ozone, NOx). Pour mieux quantifier les processus et réduire les incertitudes, la combinaison d'approches disciplinaires doit être associée à des approches pluridisciplinaires, en lien avec la société (sciences participatives par exemple). Les impacts directs de la pollution sur nos sociétés impliquent un transfert d'informations qualifiées, expertisées vers les populations et décideurs par des services dédiés (cf encart solutions et options d'action). En plus des effets directs des polluants atmosphériques, ceux-ci peuvent avoir un impact climatique, notamment pour les espèces à courte durée de vie, les « Short-Lived Climate Forcers » (SLCFs) comme l'ozone ou le méthane, tout comme les aérosols comme le carbone suie ou les sulfates. Les enjeux sur l'anthropisation et pollutions sont en lien avec ceux identifiés dans les défis sur le vivant et cycles biogéochimiques, sur la variabilité, tendance et points de bascule, et s'insèrent également dans les quatre axes prioritaires définies (Urbaine, Continuum Terre-Mer, Tropique et Polaire).

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

A propos de la pollution atmosphérique, les composés chimiques émis par des processus biogéniques et anthropiques sont transformés selon des mécanismes bio-physico-chimiques se déroulant en phase homogène (gazeuse, particulaire ou aqueuse) ou hétérogène. Plusieurs problématiques sont identifiées :

Des processus d'oxydation : la connaissance des processus d'oxydation des composés organiques volatils (COV) par les radicaux doit être encore améliorée, en particulier leur réactivité avec les radicaux halogénés et sulfates, ou la réactivité des COV à courte durée de vie comme les sesquiterpènes. L'impact de la chimie hétérogène et des processus multiphasiques nuageux sur les processus d'oxydation des COV reste également encore mal caractérisé, notamment leur rôle dans la production d'aérosols organiques secondaires (AOS). Un autre enjeu est de mieux comprendre le rôle des halogènes (chlore, brome, iode) et leur impact sur la capacité oxydante, y compris sur l'ozone et le cycle du mercure en

régions polaires, ainsi que la formation des espèces azotées (ex. HONO).

Physico-chimie sous conditions extrêmes : en conditions froides, les quelques études existantes indiquent que la capacité oxydante hivernale est loin d'être négligeable et reste mal décrite dans les modèles. Un enjeu est de mieux comprendre les processus physico-chimie en automne-hiver aux moyennes latitudes et de mieux intégrer la saisonnalité (sources, température, bilan oxydatif) dans la prise en compte des processus d'oxydation dans ces conditions. Le rôle des halogènes et les interactions avec la neige ou la glace et leur impact sur la chimie en région polaires (ou froides) sont aussi à étudier et améliorer dans les modèles. Les périodes très chaudes, liées aux changements climatiques comme les canicules ou sécheresses, ont aussi un impact sur les émissions (biogéniques) et la formation d'aérosols secondaires ou d'oxydants comme l'ozone. Les processus de dépôt des différentes espèces peuvent aussi être modifiés. Néanmoins, notre connaissance des processus dans ces conditions restent mal connus, que ce soit à l'échelle locale ou globale.

Pour améliorer des modèles en conditions extrêmes et avancer sur ces questions, des campagnes de mesures dédiées et des études en chambre/laboratoire sont nécessaires. Une meilleure compréhension de la saisonnalité pourrait passer par la mise en place d'observations en continu plus complètes permettant l'acquisition de données sur des périodes temporelles plus longues ou moins documentées, en se focalisant sur des périodes beaucoup moins explorées (besoin de campagnes de mesures en automne-hiver aux latitudes moyennes).

Les propriétés physico-chimiques et optiques des aérosols restent encore mal comprises et modélisées. Les efforts devront porter sur l'étude des processus de vieillissement des particules, notamment sur l'impact de la chimie hétérogène et multiphasique sur ces processus, qui nécessite des méthodologies expérimentales adaptées, pouvant suivre l'évolution de leurs propriétés sur de longues échelles de temps. Parallèlement, des études récentes sur la réactivité hétérogène de certains traceurs de sources de particules ou de processus de formation et/ou de vieillissement, remettent en cause leur stabilité et donc leur utilisation comme traceurs atmosphériques. Le développement de nouvelles méthodes ou l'adaptation des méthodes actuelles, en prenant en compte ces processus de réactivité hétérogènes, seront donc essentiels pour améliorer notre compréhension des sources et des processus à l'origine de l'aérosol primaire et secondaire et leur modélisation. Mieux comprendre le rôle des nuages sur la composition chimique de l'atmosphère

et sur la formation des AOS est un sujet important. Parmi les aérosols primaires, l'étude des sources d'aérosols biologiques, de leurs cycles de transport, et de vieillissement, est particulièrement importante car elle permettra de mieux appréhender leur impact sanitaire et leur rôle sur la chimie atmosphérique (dégradation microbiologique de composés, etc.).

Mélange des sources anthropique et naturelles : Des questions subsistent encore quant aux effets du mélange des masses d'air d'origine naturelle (biogénique, feux, volcans, poussières, etc) et anthropique, et sur la capacité de ce mélange à promouvoir, inhiber ou modifier la formation des polluants secondaires tels que l'ozone ou l'AOS. Par exemple, notre connaissance des impacts de l'azote réactif sur les processus d'oxydation des composés biogéniques reste lacunaire, tout comme celle de l'effet de ces mélanges sur la composition et les propriétés de l'AOS et le rôle des COVs. Il y a encore besoin de mieux quantifier le dépôt sec ainsi que le vieillissement des aérosols, leur hygroscopicité et le dépôt humide. La chimie hétérogène sur des aérosols naturels (e.g. embruns, poussière) est aussi à prendre en compte, et les rétroactions avec des espèces de l'origine anthropique. Pour mener à bien ces différentes études, le développement de nouvelles méthodologies analytiques ou instrumentales comme, par exemple, la mesure de la réactivité globale ou la mesure des compositions isotopiques (stables) des différentes molécules apparaît comme essentielle. La communauté exprime aussi un besoin de plus fortes collaborations avec la communauté des chimistes théoriciens pour répondre à ces questionnements, et notamment pour mettre en place ou améliorer des relations structure-réactivité (SAR) indispensables pour alimenter des schémas chimiques prenant en compte une spéciation de plus en plus détaillée dans les modèles.

Sources anthropiques : Les interactions entre pollution de l'air et climat demandent la prise en compte simultanée des SLCFs et des GES à plus longue durée de vie (voir Défi « variabilité, tendances et points de bascule » également). Un des premiers verrous reste la quantification de leurs sources anthropiques qui garde de nombreux points à améliorer, avec des incertitudes sur les émissions de surface très variables selon les composés, impactant ainsi les capacités de simulation de la pollution atmosphérique. L'augmentation des moyens d'observations à venir – missions spatiales GES (ex. MicroCarb, MERLIN, CO2M) et météo/composition (MTG, Metop-SG), réseaux fixes et distribués – ouvre des opportunités de synergies pour exploiter au mieux les co-émissions d'espèces et permettre de faire progresser la quantification des sources anthropiques de SLCFs et de GES. Un enjeu des prochaines années concerne l'échelle urbaine et la séparation des contributions naturelles et anthropiques (voir Aire prioritaire urbaine). Les contributions anthropiques par secteur d'activité (ex. agriculture (NH₃, CH₄), déchets (CH₄), trafic, industrie (NOx, COVs...)) restent également enta-

chées de fortes incertitudes à réduire. Enfin, le transport de polluants depuis des régions sources vers des régions lointaines (ex. l'Arctique) ou dans la haute troposphère/stratosphère, leur transformation et leur dépôt restent également à améliorer pour réduire des incertitudes de leurs impacts sur le climat.

Très fortement sous contrainte anthropique, l'interface continent-océan est le réceptacle des apports continentiels ainsi que le lieu d'une forte activité humaine, qui modifie le fonctionnement des écosystèmes côtiers et littoraux (voir aire prioritaire continuum océan-continent). Néanmoins, concernant spécifiquement les polluants et contaminants (minéraux dont métalliques, organiques dont plastiques) deux pistes de recherche nécessitent un effort de travaux. Il s'agit d'une part d'établir des flux et bilans à l'échelle des écosystèmes. Cela inclut non seulement des flux entrant (ex. apports continentaux) et sortant (e.g. vers l'océan et l'atmosphère) mais également des flux internes, en particulier les flux de relargage du matériel dissous stockés à l'échelle pluri-décennale dans les sédiments, flux encore mal connus. Il s'agit d'autre part de mesurer les processus de transferts de matière entre dissous et particulaire (incluant ex. les floculats) afin de mieux paramétrer les modèles. La Méditerranée et les mers d'Asie du Sud-Est sont des sites particulièrement anthropisés où ces questions pourraient être étudiées. Dans le cas des contaminants particuliers comme les microplastiques, comprendre et quantifier les flux internes à l'interface terre-mer sera fondamental pour résoudre l'existence d'un « puits de plastique inconnu » dans l'océan et comprendre le cycle de vie de ces contaminants.

En régions tropicales, la forte croissance démographique dans la zone intertropicale va s'accompagner d'un développement économique, d'une élévation du niveau de vie avec une urbanisation renforcée, et d'un développement des moyens de production d'énergie. Les émissions de GES et de polluants pourraient être amenées à fortement augmenter selon les choix énergétiques et les politiques environnementales qui seront mises en place par les pays concernés. La qualité de l'air et le climat sont sous surveillance avec des dépassements réguliers des niveaux de polluants recommandés par l'OMS. Il va s'agir de caractériser physico-chimiquement de nouveaux polluants émergents ou non répertoriés et d'étudier l'évolution de la composition chimique des aérosols et de leur impact sur la qualité de l'air, les écosystèmes et le forçage radiatif dans un contexte en constante évolution/mutation. On s'intéressera aussi à l'impact de la qualité de l'air sur la santé des populations avec des modèles d'exposition individuelle au risque particulier (émissions/développement urbain/mobilité). Pour prévenir les risques liés à un développement sans contrôle, on cherchera à développer des services climatiques pour favoriser les politiques d'atténuation des émissions de GES et de développement des énergies renouvelables.

Dans les régions polaires, en plus des impacts sur le climat, les polluants, y compris les aérosols ou les contaminants, comme le mercure, les HAPs, ou les micro/nano-plastiques, ont un impact sur la santé des écosystèmes ou des populations locales mais leurs bilans (atmosphère, océan, cryosphère, terrestre) restent incertains. Le dépôt des aérosols ou espèces traces comme l'ozone sur les écosystèmes en région polaire restent encore mal quantifiés : Par exemple, les panaches de pollution venant des feux pouvant impacter des écosystèmes marins en océan Arctique en tant que source de nutriments. Les feux jouent aussi un rôle dans la ré-émission du mercure ou d'autres contaminants (les « legacy » émissions). Le rôle des surfaces cryosphériques, du permafrost ou encore de la végétation arctique, et les échanges océan-atmosphère-glace restent encore mal contraints pour le mercure alors que les changements climatiques affectent en profondeur ces composantes de l'Arctique avec des conséquences à venir sur le cycle du mercure à l'échelle globale. Le bilan des microplastiques et, en particulier des nano-plastiques, en région polaire restent très mal compris en particulier leurs stockages dans la glace et leurs effets néfastes sur la biodiversité polaire. La disparition rapide de la glace de mer en Arctique ouvre l'accès à de nouvelles ressources et voies maritimes qui pourraient engendrer des nouvelles pollutions (e.g. sonores ou chimiques) ainsi que l'importation de nouveaux pathogènes.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

La communauté océan-atmosphère possède une expertise forte sur un spectre large de moyens d'études : mesures de laboratoire et en chambre, sites d'observation labellisés, mesures *in situ* au sol et aéroportés, observations satellitaires, moyens d'observation sur le long terme, analyse de données, et une gamme de modèles internationalement reconnus du 0D au 3D. Mais, en termes scientifiques, une des grandes difficultés actuellement reste la réduction des incertitudes liées au rôle de la chimie hétérogène/multi-phasique et la transposition des connaissances acquises en laboratoire par des approches multiples aux modèles chimie-aérosol atmosphériques. De même, pour progresser sur les problématiques de la physico-chimie en conditions extrêmes (ex. conditions froides) ou de la réactivité, le renforcement d'interactions avec des chimistes d'autres disciplines (chimie théorique, combustion, etc) est à encourager. Enfin, l'étude des processus de dépôt, notamment humide, est assez peu abordée dans nos communautés.

La capacité de la communauté à mettre en place des projets d'envergure couplant campagnes de mesures sol, aéroportées, observations satellitaires et développement de modèles à différentes échelles est une force (ex. AMMA, ACROSS-PANAME). Cette capacité de rapprochement des communautés pour aller vers des approches de plus en plus intégratrices, monter des campagnes d'envergure et pour développer, renforcer des moyens d'observations, accompagné via les pôles de données par une aide à la

gestion, l'utilisation et la valorisation des données est à renforcer.

La communauté est implantée dans de nombreux programmes internationaux (SPARC, IGAC, ...). Mais, en termes structurels, certains verrous limitent la capacité à mener des recherches sur ce défi : les lourdeurs excessives pour financer des projets d'envergure (multi-guichets), le surenagement des communautés dans des campagnes de mesures, et enfin une faiblesse des recrutements (chercheurs, ITA) faisant craindre une perte d'expertise dans certains domaines (comme par exemple sur la réactivité chimique élémentaire). La structuration de la communauté pollution atmosphérique est essentiellement portée par l'action LEFE-CHAT. À ce jour, la thématique de la pollution n'est pas ou marginalement incluse dans les grands programmes nationaux (ex. PEPR, PPR Océan et Climat), ce qui affaiblit la communauté.

Les synergies entre les différents moyens d'observations y compris des données satellites et l'amélioration des modèles sont à renforcer ainsi que les liens pluri ou interdisciplinaires (ex. surface/atmosphère en lien avec l'agriculture). Pour avancer sur les questions fondamentales, plus de rapprochement avec d'autres communautés (chimie théorique, combustion) est souhaitable. Les avancées dans l'analyse des observations satellitaires (ex. restitution des propriétés des nuages ou aérosols) constituent des opportunités pour progresser, en synergie avec la modélisation.

RECOMMANDATIONS

Les priorités et recommandations suivantes sont identifiées par la communauté :

- Poursuivre et renforcer les travaux sur les questions fondamentales du domaine et leur simulation dans les modèles pour réduire les incertitudes et mieux quantifier la qualité de l'air et les impacts des SLCFs sur le climat. La piste de développer des modèles intermédiaires entre la mesure et la modélisation 3D régionale est à poursuivre ainsi que l'amélioration des modèles globaux de chimie-climat français.
- Poursuivre des approches intégratrices en zone de mélange naturel/anthropique pour améliorer la compréhension des processus et leur représentation dans les modèles.
- Développer de nouvelles capacités instrumentales (ex. réactivité totale, composition isotopique) ainsi que des nouvelles mesures de profils *in situ* (drones, ballon, aéroportés).
- Articuler quand c'est utile, de manière équilibrée, ces activités de recherche avec les développements de services opérationnels publics ou privés est un enjeu pour la communauté.
- Développer des études permettant de boucler les cycles du méthane, à l'interface GES/SLCFs, et notamment sur l'évolution des radicaux OH, sur la représentation du mé-

thane stratosphérique et sur la quantification des sources naturelles continentales et leur évolution dans un climat changeant.

Un axe important sera d'améliorer les paramétrisations de chimie aqueuse dans les nuages et sous les nuages pour une meilleure représentation du dépôt humide en combinaison avec des études expérimentales dédiées. Une piste serait de s'orienter plus vers des couplages de modèles biogéochimiques avec modèles de physico-chimie atmosphérique afin de mieux représenter les émissions et les dépôts en-ligne.

Les multi- et transdisciplinarité OA/SIC et INSU/INEE/SHS/TS apparaissent comme une nécessité pour répondre aux enjeux sociétaux posés par les interactions climat / pollution / société / économie / vivant. Un rapprochement avec d'autres instituts comme INC (chimie théorique) ou INSB (biologie) serait souhaitable.

Des rapprochements INSU-INEE sont à promouvoir, par exemple dans l'étude des cycles biogéochimiques des nutriments qui sont à l'origine des émissions par les surfaces continentales et océaniques, qui vont ensuite impacter la physico-chimie de l'atmosphère, ou l'impact du dépôt sur les écosystèmes.

Des rapprochements INSU-SHS sont indispensables pour étudier l'homme en lien avec son environnement dans un contexte d'évolution rapide de celui-ci, surtout en zone urbaine, afin de promouvoir les sciences de la durabilité, voire d'associer les citoyens à des projets de recherche (sciences citoyennes, sciences participatives). Les liens au sud avec l'IRD et les universités / instituts locaux sont à renforcer dans ce cadre.



Défi « Couplages et interactions d'échelles »

LES ENJEUX

Les interfaces océan-atmosphère, surface continentale-atmosphère, cryosphère-atmosphère, cryosphère-océan ou encore plancher océanique - colonne d'eau océanique sont des zones d'échanges de différentes natures (chaleur, quantité de mouvement, eau douce, gaz, aérosols, apports en nutriments et éléments traces). Ces échanges se produisent sur une vaste gamme d'échelles spatio-temporelles qui interagissent entre elles. Par exemple, les circulations atmosphériques et océaniques de grande échelle affectent les échanges turbulents entre l'océan et l'atmosphère et la formation de structures de méso-échelle, qui en retour influencent des grandeurs de grande échelle telles que le bilan d'énergie global, les transports de chaleur ou le stockage de carbone dans l'océan. La compréhension et la modélisation de ces couplages aux différentes échelles est un enjeu pour à peu près tous les défis de la prospective : la variabilité du système océan-atmosphère, l'occurrence des événements extrêmes, les cycles biogéochimiques ou encore la prévision numérique du temps et du climat.

L'expertise française sur cette thématique est très riche, couvrant à la fois des aspects théoriques (dynamique des fluides géophysiques), d'observation (développement instrumental, analyse), de modélisation à différentes échelles, et de compréhension des processus.

Un enjeu majeur est de mieux comprendre l'évolution des couplages dans un système Terre en changement, et les nombreuses boucles de rétroaction qui sont associées à cette évolution. Comment les couplages sont-ils modifiés sous l'augmentation de la température ou des précipi-

Déploiement (juillet 2022) d'un châssis instrumenté du LOPS depuis le Marion Dufresne 2 dans la zone du volcan sous-marin de Mayotte. Un châssis instrumenté du Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale de Brest est déployé. Il comporte un courantomètre ADCP pour mesurer les courants marins, à haute fréquence, entre 1500 et 1000m de profondeur environ, ainsi que les propriétés hydrologiques de l'eau de mer près du fond, au centre de la zone du fer à cheval de Mayotte.

L'objectif est d'une part, d'étudier les processus océanographiques responsables de la dispersion des gaz volcanique émis dans la colonne d'eau, et d'autre part, de préparer le déploiement d'un observatoire permanent et câblé dans cette zone, dans le cadre du programme MARMOR (PIA3 - Equipex +)

© Jérôme Paillet / Lops / CNRS Images



tations, et avec quelles conséquences? Certaines zones géographiques sont-elles plus sensibles que d'autres? Mieux observer, comprendre et modéliser les couplages et leurs interactions à différentes échelles spatio-temporelles restent donc des priorités pour la communauté OA.

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Développer les couplages

L'insertion du couplage avec les vagues conduit à repenser les transferts de quantité de mouvement et de chaleur et revoir la théorie des flux turbulents en présence de courants océaniques et de vagues. Si des paramétrisations des flux turbulents de surface prenant en compte à la fois le courant et des paramètres de vagues existent, la cohérence et l'équilibre du bilan de quantité de mouvement sont souvent absents. Les rétroactions des vagues peuvent aussi moduler les autres interactions que l'on connaît bien (thermiques et mécaniques) mais ces modulations sont à quantifier en fonction des échelles considérées (sous-méso, méso, grande échelle).

L'interaction entre la houle, la glace de mer et les glaciers doit être mieux comprise afin de mieux prévoir la stabilité des calottes. Une évolution des méthodes d'échanges chimiques à l'interface surface/atmosphère, en particulier des dépôts et des émissions biogéniques) est souhaitée en allant vers des modèles mécanistiques multicouches (voir aussi Défis Anthropisation et pollutions; et Vivant et biogéochimie).

La paramétrisation des processus de méso-échelle et sous-méso-échelle dans la couche limite océanique doit progresser. Cela peut passer par une structuration de la communauté française travaillant autour de ces questions afin de mutualiser les connaissances des processus, partager des simulations de référence (par ex LES océan) et échanger sur les différentes hypothèses des schémas.

Traiter les hétérogénéités

La documentation des hétérogénéités de surface doit être améliorée qu'elles soient fixes naturelles (occupation du sol, relief) ou liées à l'anthropisation des surfaces comme la déforestation, l'irrigation, l'urbanisation (par ex. forte augmentation des parcs photovoltaïques ou éoliens à terre et en mer) ou transitoires (répartition de l'humidité, couverture neigeuse, courants, fracturation de la glace, mares de fonte sur la banquise, effets de dépôts d'impuretés sur la neige...) et présentes à différentes échelles notamment méso- et sous-méso-échelle (lisière ou lignes d'arbres, film biologique, hétérogénéités de couverture nuageuse à très fine échelle). Leurs impacts sur les différentes couches limites atmosphériques ou océaniques doivent être mieux quantifiés.

C'est le cas, en particulier, des hétérogénéités de glace de mer (fractures etc.), du rôle des vagues dans celle-ci, et de

la sous-méso-échelle océanique qui sont peu observées. Il reste difficile d'estimer la rugosité sous-maille de la glace de mer en tenant compte des marées et des formes très variées d'ouvertures dans la glace (fractures, polynies, zone marginale).

Plus généralement, il s'agit de comprendre comment améliorer notre compréhension de la physique de la mesure dans un milieu hétérogène et comment faire une mesure représentative en terrain complexe (que ce soit en termes de topographie, d'hétérogénéités de paysage ou de courants). Ces besoins posent la question du réalisme de la représentation de ces différentes hétérogénéités dans les modèles de différentes échelles: à partir de quelles tailles ces hétérogénéités vont-elles avoir un impact sur les couches limites et la convection atmosphérique ou océanique? Et jusqu'à quelle hauteur ou profondeur? Quelles échelles doivent être prises en compte pour représenter correctement la circulation de grande échelle dans les modèles? Faut-il revoir les méthodes actuelles permettant de représenter l'hétérogénéité sous-maille? Comment propager vers l'atmosphère des multi-bilans de surface? Avec une discrétion verticale toujours plus fine, faut-il donner une épaisseur aux obstacles et prévoir leur couplage avec différents niveaux de l'atmosphère?

Certaines hypothèses (par exemple la théorie de similitude de Monin-Obukhov) sont remises en cause en présence d'hétérogénéités. Peut-on résumer l'hétérogénéité à des fractions de surface couverte ou faut-il tenir compte de l'organisation spatiale? Comment gérer les hétérogénéités multiples, par ex co-existence de glace de mer, iceberg, océan ouvert et plateformes glaciaires avec une topographie sous-maille cruciale pour la prise en compte de la fonte dans les modèles ou co-existence de glace, neige et mares de fonte?

Enfin, un bon nombre de ces hétérogénéités peut aussi générer des phénomènes de brise aux interfaces de différentes natures (par exemple, en présence de mares de fonte sur la neige ou la glace), ce qui implique *a priori* une représentation à une échelle spécifique jusqu'à présent non pris en compte dans les modèles.

Multiplier les observations conjointes aux différents milieux

Pour progresser sur la compréhension, l'observation et la modélisation de l'interface océan-atmosphère ou océan-glace-atmosphère, il est nécessaire de multiplier les observations conjointes et co-localisées de ces milieux. Afin d'exploiter au mieux les observations satellites de la rugosité de surface sur l'océan, un travail sur les fonctions de transfert (par exemple de la rugosité sur le vent) est nécessaire à fine échelle s'appuyant sur la physique des processus. Plus généralement, développer des opérateurs d'observations permettra de tirer le maximum de ces observations satel-

lites permettant d'extraire les variables géophysiques d'intérêt ou facilitant l'assimilation.

Exploiter la hiérarchie de modèles

L'existence d'une suite (ou hiérarchie) de modèles numériques opérant à des résolutions spatiales plus ou moins fines et sur des domaines plus ou moins étendus est une opportunité pour mieux comprendre les couplages et les interactions d'échelles. Par exemple, les modèles atmosphériques ou océaniques de méso-échelle utilisés sur des domaines de plus en plus grands (allant dans certains cas jusqu'à l'échelle globale) permettront de mettre en évidence la rectification éventuelle de l'état moyen et/ou de la variabilité du système océan/atmosphère à grande échelle par les phénomènes de petite échelle (tourbillons ou filaments dans l'océan, systèmes convectifs et circulations de méso-échelle dans l'atmosphère). Cette rectification peut révéler des couplages insoupçonnés, et l'analyse des processus mis en jeu peut aider à proposer des représentations physiques ou statistiques de l'effet de ces couplages dans les modèles d'échelle moins fine.

Les modèles de plus haute résolution spatiale permettent *a priori* une meilleure représentation de l'orographie et de son impact sur l'atmosphère (e.g. blocages). Cela peut être une opportunité pour tester la représentation du forçage orographique dans les modèles moins résolus. Les modèles de résolution kilométrique représentant la convection profonde de manière explicite pourront aussi éclairer les fondements des paramétrisations de la convection et aider à mieux comprendre les couplages entre la convection profonde et l'environnement à grande échelle. De même, les simulations couplées océan-atmosphère à très fine échelle pourront aider à tester et éventuellement revoir la représentation physique des deux compartiments. Les modèles kilométriques globaux (couplés ou non) offriront la possibilité d'examiner, pour la première fois, l'interaction entre les phénomènes de méso-échelle, la circulation générale de l'atmosphère et/ou de l'océan, et le bilan radiatif global. L'augmentation de la résolution pose toutefois la question de l'évaluation et de la calibration de ces modèles. À certains égards, la montée en résolution peut faciliter la comparaison des simulations avec les observations (par exemple lorsqu'il s'agit d'évaluer le cycle de vie des systèmes convectifs à l'aide d'observations spatiales). Mais les observations ne sont pas toujours disponibles à fine échelle. La définition de méthodologies d'évaluation efficaces et de métriques adaptées constituera donc aussi un enjeu de recherche dans les prochaines années. L'assimilation de données en mode couplé se développe, mais l'impact d'une telle assimilation dans les réanalyses et les prévisions saisonnières reste à quantifier.

À l'autre extrémité de la hiérarchie de modèles, les modèles de complexité intermédiaire (EMICs en anglais) permettent d'étudier le rôle des interactions entre les différents compartiments du système Terre sur de très longues échelles de

temps avec une représentation spatiale des phénomènes très limitée. Ces modèles ont longtemps été utilisés pour étudier par exemple les couplages entre le climat et le cycle du carbone ou les calottes polaires. Il devient aujourd'hui possible d'étudier ces mêmes couplages avec des modèles de circulation générale. La comparaison des conclusions obtenues avec ces différents types de modèles éclairera notre compréhension du rôle des interactions d'échelles dans ces couplages.

LES OPPORTUNITÉS

La mise en œuvre de ces objectifs scientifiques est favorisée par un certain nombre d'opportunités, au premier rang desquelles on compte la structuration de la communauté et les outils communautaires que les tutelles ont implémentés. La mise en place des pôles de services et de données au sein de l'IR DataTerra est cruciale car l'interopérabilité à laquelle elle travaille est un prérequis indispensable à la fusion inter-compartiments des données.

La communauté fournit un travail collectif de qualité qui est favorisé grâce aux réseaux thématiques (DEPHY par exemple), des infrastructures de recherche (CLIMERI), des programmes nationaux notamment (LEFE/IMAGO, PPR Océan et climat ou PEPR TRACCS) mais aussi à des groupes de discussion de plus petite échelle. Les grandes campagnes de mesures pilotées par la France (AMMA, HYMEX, EUREC4A, HILIAISE) ont permis d'avancer sur ces questions et donnent une grande visibilité aux travaux français.

En termes de mesures, plusieurs campagnes récentes ou à venir apporteront de nouvelles observations de ces couplages (TEAM-X, HILIAISE, EUREC4A-OA, MAP-IO, MO-SAI). Les grandes campagnes de mesures et projets internationaux de modélisation sont une opportunité, d'autant plus que les données produites sont de mieux en mieux distribuées. Proposer des outils qui permettent de facilement revisiter des campagnes passées pour aborder de nouvelles questions est possible via les pôles de services de données de type AERIS et ODATIS.

Les réseaux d'observations soutenus par les infrastructures de recherche tels ACTRIS et ICOS sont clés mais la mesure des flux d'énergie y est encore peu intégrée. Le développement de mesures dédiées doit se poursuivre par une palette d'instruments embarqués (cf mise en œuvre, développement instrumental). Le PolarPod, une station polaire TARA, ainsi que le réseau de stations PROMICE installé sur le pourtour du Groenland, pourraient aider à documenter les conditions polaires. Tirer parti des observations globales de plus en plus accessibles et de plus en plus nombreuses est un vrai défi. De nouveaux satellites (SWOT, Harmony, ODYSEA, TRISHNA, Sentinel) devraient améliorer notre connaissance des couplages courants/vents, vents/vagues, ainsi que ceux impliquant les couches de surface océaniques, la glace de mer et la neige...

En termes de modélisation, le GdR DEPHY propose d'étendre la méthodologie 'standard' d'évaluation et de calibration des paramétrisations sous-maille au cas couplé océan-atmosphère et continent-atmosphère. Pour cela, la mise à disposition de simulations LES couplées (désormais possibles avec des codes comme CROCO pour LES océan, Méso-NH pour LES couplée surface continentale/atmosphère ou bientôt océan/atmosphère ou encore Basilisk pour DNS/LES en milieu multiphasique) sera un vrai bénéfice. Plus généralement, il est important de poursuivre les efforts de développement des modèles couplés communautaires à différentes échelles.

Pour la végétation et le transport de neige par le vent, le couplage entre végétation et profil de neige, l'existence de modèles beaucoup mieux résolus pouvant servir de benchmarks pour les modèles grande échelle est aussi encourageant. Le développement de systèmes couplés régionaux océan-atmosphère à échelle hectométrique et kilométrique avec ou sans assimilation de données permettra d'évaluer l'apport du couplage à différentes échelles de prévision. La prise en compte de schémas de neige plus complexes sur la banquise ou sur les calottes que ce qui existe déjà, notamment en mettant en place un couplage direct devrait accroître le réalisme des simulations dans les zones polaires. En plus des développements des modèles de neige, la représentation des interactions entre l'océan et les plateformes de glace dans NEMO ouvre la voie au couplage de calottes polaires dynamiques dans les ESMs français (ESM2025 et TRACCS).

En terme d'outils, l'apprentissage machine permettra de compléter les données existantes (estimation de flux de surface à partir de capteurs low-cost par ex), proposer des nouvelles approches statistiques de comparaison observations/modèles sur le long terme, construire de nouvelles paramétrisations sous-maille ou calibrer les modèles sur les aspects couplages (en adaptant les approches High-Tune à la représentation du couplage). L'assimilation de données pourra aussi être enrichie par l'apprentissage machine, en plus d'autres développements comme l'assimilation compatible avec des schémas de neige plus complexes ou l'assimilation dans les systèmes couplés. Les données d'opportunités très nombreuses en ville peuvent apporter une documentation à fine échelle de la variabilité atmosphérique près de la surface.

Aires prioritaires

Si l'échelle planétaire reste l'horizon intégrateur du fonctionnement du compartiment océan-atmosphère, à l'échelle cette prospective, les six défis scientifiques esquissés ne peuvent tous être avancés sans que notre communauté se focalise sur des zones, régions, bassins, interfaces prioritaires. Le choix de ces aires prioritaires a été élaboré sur une grille d'analyse multiple prenant en compte (i) l'adéquation avec les défis scientifiques - par exemple s'intéresser à la convection implique nécessairement de travailler aux régions tropicales; s'intéresser aux points de bascule climatique à la réponse des calottes polaires; s'intéresser à l'anthropisation à la ville, etc.-; (ii) la focalisation sur des enjeux sociétaux, en particulier dans les régions les plus densément peuplées (urbain, tropiques, côtier); (iii) l'intérêt aux régions sensibles voire vulnérables aux changements environnementaux en cours (polaire, tropiques, côtier) et (iv) le lien avec les forces de notre communauté océan-atmosphère (moyens d'observation, infrastructures, organismes). Ces aires prioritaires constituent des points focaux qui devraient synergiser les efforts de la communauté, à l'échelle nationale de manière transverse inter-organismes, mais aussi permettre de fédérer à l'échelle internationale (européenne notamment) la déclinaison des défis scientifiques. L'absence de certaines régions dans ces aires prioritaires, ne doit pas être lue - comme toutes les recommandations issues de cette prospective, comme l'indication que celles-ci ne sont pas scientifiquement critiques dans

le fonctionnement du système climatique, ou d'un intérêt scientifique mineur.

Ces aires prioritaires, sont volontairement plus larges géographiquement que les chantiers qui avaient été précédemment lancés par le CNRS-INSU, et s'insèrent également dans des collectifs dépassant la communauté océan-atmosphère. À ce titre le lien avec des programmes exploratoires de programmation de recherche, comme le PEPR Bridges pour le côtier et tropiques, peut être évident, mais ces aires - tout comme les défis scientifiques-, peuvent servir d'éléments constitutifs pour d'autres programmes structurants et transformants, à consolider, pour lesquels la communauté OA pourra être force de proposition.

Pour chaque aire prioritaire, l'analyse de la prospective a identifié les questions scientifiques liées à ces enjeux, les verrous scientifiques à lever, l'alignement des forces de la communauté pour proposer quelques recommandations et pistes d'orientation scientifiques.

LES ENJEUX ET VEROUS

Le milieu urbain se définit tout d'abord par une densité importante de population et par le nombre de fonctions qui s'exercent sur son territoire. La recherche en OA sur le périmètre urbain est à l'interface avec d'autres disciplines académiques, avec des acteurs opérationnels et socio-économiques et en lien direct avec des problématiques sociétales fortes. Les questions traitées sont donc fortement interdisciplinaires et intersectorielles avec des implications directes sur la protection des populations face aux risques environnementaux et sur l'amélioration de la résilience et de la durabilité des villes. L'objet d'étude intègre les mégapoles et les villes moyennes dans différents types d'environnements géographiques, les fronts d'urbanisation et les zones côtières anthropisées.

La problématique scientifique propre au milieu urbain est en lien direct avec les questions identifiées dans les défis portant :

- sur l'anthropisation des milieux. Elle concerne par exemple l'îlot de chaleur urbain ou la pollution atmosphérique (et donc les processus de micrométéorologie et de chimie atmosphérique sous-jacents) ;
- sur les interactions d'échelles (hétérogénéité et descente d'échelle) ;
- sur la caractérisation des impacts des événements extrêmes (e.g. impact des vagues de chaleur).

Le milieu urbain est un milieu hétérogène aux interactions complexes qui impose de descendre en échelle spatiale (parfois jusqu'à l'échelle de la rue) et temporelle afin de comprendre les différents processus dynamiques, de bilan d'énergie et d'émissions ou de formation de polluants et de gaz à effet de serre. La compréhension de l'évolution des microclimats urbains sous l'effet du réchauffement climatique est un enjeu essentiel pour l'habitabilité future de nos villes. Réciproquement, l'impact de l'augmentation de la superficie, de la démographie et des activités humaines au sein des villes doit être mieux pris en compte dans la modélisation du système climatique à moyenne ou à grande échelle.

L'atmosphère urbaine a une spécificité en termes d'empreinte chimique du fait de la forte concentration des sources d'émission de composés gazeux ou particuliers (ex : trafic routier, chauffage domestique, eaux usées, industrie, activité portuaire). Ces sources anthropiques sont amenées à évoluer à court terme sous l'effet des réglementations (Directives européennes et leurs déclinaisons nationales et régionales pour la qualité de l'air, plans climat) et de l'accroissement urbain (mégapoles). Parallèlement, les transitions urbaines comme la végétalisation de l'espace urbain ou la

décarbonation des moyens de transport et de production ont un impact sur la composition atmosphérique en milieu urbain. L'étude des émissions de composés chimiques plus ou moins réactifs, de leur transport atmosphérique, de leur transformation dans l'atmosphère urbaine et de leur impact sur la population constituent un axe fort de recherche pour la communauté OA. Les contributions respectives de la part anthropique, de la part advectée et de la part naturelle de cette pollution atmosphérique doivent aussi être mieux estimées. Ceci représente un défi méthodologique de taille en lien avec la finesse des échelles ciblées et la nécessité de conserver des approches multi-échelles.

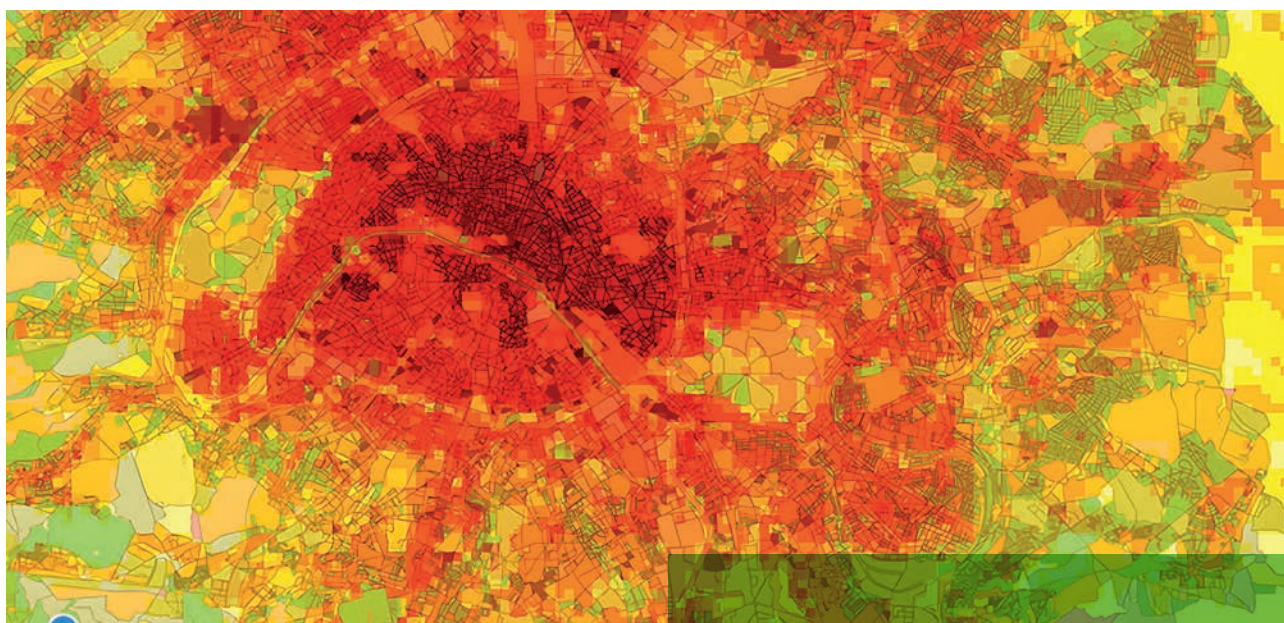
LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Réchauffement climatique et microclimat urbain : mécanismes de couplage et impact sur l'habitabilité des villes.

Du fait de la concentration de personnes, biens et infrastructures en ville et de la vulnérabilité et des aléas de ces milieux, la quantification et la prédiction des risques météorologiques aux différentes échelles (régionale jusqu'à hectométrique), et l'évaluation de la transformation des événements extrêmes en risque intégré pour la population urbaine constituent un enjeu fort, tout comme l'amélioration de la prévision météorologique en ville. Celle-ci passe par une meilleure caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle du micro-climat urbain à l'échelle infra-urbaine et des quartiers, afin de mieux comprendre les processus physiques en jeu au sein des surfaces dans la zone critique urbaine et extra-urbaine et de la couche limite atmosphérique. La question de l'influence du milieu côtier sur les zones anthropisées en relation avec le réchauffement climatique, le transport maritime, et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes est également posée, et ce dans des environnements urbains aux spécificités orographiques particulières. Les travaux à venir de la communauté doivent permettre d'appuyer scientifiquement les décisions de remédiation et d'adaptation afin de rendre la ville plus résiliente aux changements environnementaux.

Impact de la ville sur le climat et l'environnement régional

L'impact de la ville sur son environnement et le climat, a minima à l'échelle régionale, implique un changement des moyens de mesure et d'appréhension de ces effets. Ce changement nécessite l'intégration d'aspects fortement inter-disciplinaires qui rappellent la philosophie et les approches développées pour l'étude de la zone critique. En



Visualisation des îlots de chaleur sur Paris et sa banlieue, obtenue par modélisation numérique lors d'une soirée d'été dégagée.

© CNRM

termes de modélisation, la descente d'échelle opérée sur les modèles de climat dans le cadre du programme CORDEX permet désormais de produire des ensembles de simulations climatiques à une résolution horizontale (~3 km), échelle ouvrant la possibilité d'appréhender structurellement les interactions entre les villes et le climat régional. Des enjeux spécifiques demeurent également en lien avec l'anthropisation des zones côtières très denses (20% de la population mondiale vivant à moins de 30 km des côtes), et qui sont en forte croissance depuis plusieurs décennies.

Émissions et devenir de composés chimiques d'intérêt atmosphérique (voir aussi Défi « Anthropisation et pollutions »)

La recherche OA en milieu urbain implique d'être capable de considérer un continuum multi-échelle depuis l'échelle continentale ou régionale jusqu'à l'échelle de la rue. La diversité des composés chimiques présents dans le milieu urbain est vaste. Elle intègre des composés connus et d'autres émergents : gaz à effet de serre, polluants gazeux et particules. L'enjeu actuel est de déterminer l'ensemble des émissions des composés chimiques par des cadastres d'émissions pour mieux renseigner les facteurs d'émissions en affinant et quantifiant les incertitudes associées. Parmi les facteurs de complexité émergents, l'importance des sources ponctuelles intenses insérées dans le tissu urbain (zones industrielles, portuaires et aéroportuaires) apparaît comme ayant des impacts sur la composition de l'atmosphère de fond urbain. Les espèces biogéniques de la végétation urbaine et celles des zones agricoles ou forestières présentes dans les zones attenantes aux agglomérations sont également à prendre en compte. Comme pour la dynamique atmosphérique, ces études requièrent une descente d'échelle pour représenter la physico-chimie rapide de la matière organique, avec notamment la prise en compte de

la chimie radicalaire et des interactions inorganiques/organiques, de la volatilité intermédiaire et du continuum gaz / particules.

Quel impact sanitaire en relation avec le risque chimique et climatique ?

En raison de l'occurrence de vagues de chaleur régionales, le risque sanitaire lié à l'effet de surchauffe en milieu urbain doit également être mieux évalué ainsi que ses interactions avec la composition de l'atmosphère. Cette problématique étant fortement transverse à différents organismes et agences (ex : Santé Publique France, ARS) et à d'autres acteurs académiques (sociologues, urbanistes, juristes), la coordination des efforts est particulièrement importante. Des liens scientifiques importants entre la recherche sur les composants gazeux et particulaires, leurs potentiels toxiques (ex : potentiel oxydant des aérosols), l'interaction avec la biologie humaine et la recherche épidémiologique et sanitaire à travers la constitution de cohortes permettant d'estimer conjointement exposition individuelle et état de santé sont à renforcer.

Les sciences atmosphériques au cœur de la société urbaine

La co-construction des connaissances avec la société civile permet de faire émerger des orientations viables d'un point de vue de l'acceptabilité et de la mise en œuvre. Ceci nécessite de la communauté une adaptation de l'offre de

formation (vulgarisation et formation continue), des outils analytiques (capteurs, démonstrateurs numériques) et une meilleure intégration des sciences participatives. Au sein même de la communauté académique et des instituts de recherche (INSU, INEE, INSERM), les pratiques et expériences sont sans doute trop peu partagées. L'absence de modèle de fonctionnement pour aborder ces questions de l'environnement urbain souligne le besoin de partage d'une vision plus générale des modes de fonctionnement de chacun.

Les activités de recherche de la communauté en milieu urbain sont fortement interdisciplinaires (et inter-instituts et inter-organismes). Les processus (physiques, chimiques et biologiques) sont fortement interdépendants. Des synergies entre émissions de GES et de polluants à courte durée de vie offrent des opportunités de mieux comprendre les émissions anthropiques. Ce n'est pas propre au milieu urbain mais ces mécanismes de connexion s'y trouvent exacerbés. La quantification des facteurs de risques et l'expertise des réponses apportées obligent les scientifiques à sortir de leur zone de confort et à se confronter à de nouveaux défis tant du point de vue académique (interface avec les SHS et la recherche médicale) que du point de vue de la société (interface avec le politique et la société civile).

ALIGNEMENT DE NOS FORCES

La communauté OA est fortement impliquée dans l'étude du milieu urbain à travers trois problématiques principales : la météorologie urbaine, la composition atmosphérique autour des problématiques de qualité de l'air et de gaz à effet serre, et leurs impacts sanitaires et environnementaux. Les efforts sont structurés via différents programmes de recherche européens ou nationaux (eg. RI-URBANS, H2C et ICOS-Cities avec Paris comme ville pilote), qui peuvent aller de l'étude de processus fondamentaux aux études d'impact sur les populations. La densité de population du milieu urbain favorise également l'interaction avec le domaine SIC, avec les SHS, et avec la société civile pour et par la recherche scientifique. Les recherches s'effectuent dans un contexte régional fort, en lien avec les dynamiques de développement des zones métropolitaines. Le rôle des super-sites instrumentés liés aux observatoires est essentiel pour la visibilité des recherches en sciences OA, et pour la structuration des équipes et des projets. Des thématiques régionales sont identifiées et portées par des consortium interdisciplinaires (eg. à Marseille autour de l'étude de la composition et de la dynamique atmosphériques de villes côtières du bassin méditerranéen). Les programmes de recherche portés par les équipes s'inscrivent dans les plans de développement des collectivités (e.g. Lille, Dijon, Grenoble, Toulouse). Il y a donc une dynamique forte et une très bonne implication de la communauté OA sur la recherche dédiée au milieu urbain. La structuration nationale offerte par les bases de données (AERIS, DATA-TERRA...) et les services associés sont également une force.

OPPORTUNITÉS POUR PROGRESSER

Le rôle des observatoires

Les observatoires (SNO) et les super-sites (Sites Instrumentés notamment) sont des outils importants du lien entre acteurs académiques et opérationnels même si à ce jour on constate une grande disparité entre les différents domaines d'étude (qualité de l'air, météorologie urbaine, océanographie côtière). Ils garantissent un suivi sur le moyen et le long terme des variables d'intérêt pour les questions de pollution atmosphérique et de changement climatique. Ils sont un point d'ancrage important pour la mise en place de campagnes de mesures et jouent un rôle essentiel dans la co-construction des services atmosphériques entre les structures opérationnelles et la recherche. Dans ce contexte, le nouveau service national d'observation OBSERVIL, labellisé par l'INSU-SIC en 2020 semble être une initiative importante qui pourrait permettre d'élargir son champ thématique (hydrologie urbaine, pollution des eaux...) aux observables OA. En ce qui concerne les mégapoles émergentes au Sud, au sein desquelles les impacts sont souvent amplifiés par rapport aux villes du Nord, la communauté OA est fortement impliquée et bénéficie des outils de coordination de l'action scientifique au niveau des organismes (par ex. Communauté de Savoir Ville Durable de l'IRD) et des agences (par ex. Belmont Forum, Future Earth).

Les moyens expérimentaux

La communauté OA dispose ou est capable de développer l'instrumentation scientifique permettant d'accéder finement aux paramètres des processus dynamiques ou chimiques. De plus, les plateformes mobiles (avions légers e.g. PiperAztec, drones, ballons, et ballons captifs...) ouvrent des opportunités d'accès à de nouvelles échelles spatiales et temporelles. Parallèlement, la densification des réseaux de mesures urbains via la participation citoyenne est une véritable opportunité qu'il convient de mieux exploiter, tout en gardant à l'esprit que cette densification doit prendre en compte la durabilité des capteurs et la limitation de l'empreinte environnementale ainsi que des développements méthodologiques dédiés (voir défi Anthropisation & pollutions). Enfin, les missions d'observation de la Terre et les futures missions spatiales opérationnelles ou à vocation recherche et les services associés seront essentiels pour l'étude de l'environnement urbain.

La modélisation numérique

L'apparition récente des modèles climatiques kilométriques urbanisés, notamment dans le cadre de CORDEX, permet maintenant d'étudier les interactions entre ville et climat régional, mais aussi les impacts associés en milieu urbain, ouvrant la voie à la conception de services climatiques tenant compte des échelles climatiques à urbaines. La tendance forte de descente en échelle des outils de modélisation, via

parfois des changements de paradigme dans l'approche numérique (e.g. Monte-Carlo), permet aussi de représenter les processus physiques (ie. structure infra-urbaine de l'îlot de chaleur urbain) et chimiques (ie. chimie radicalaire, composés semi-volatiles) à l'échelle de la rue. Ceci ouvre la voie au développement et à la validation de paramétrisations novatrices pour les modèles à résolution moins fine. À l'instar des approches couplées utilisées pour modéliser le climat, il existe également la volonté de développer des approches de modélisation intégrées pour la ville. Cela passe par le couplage des modèles de météorologie et de qualité de l'air à l'échelle urbaine mais on doit imaginer d'aller au-delà pour répondre à des questions croisées sur les effets de l'urbanisation, du changement climatique et des aménagements du territoire. Le développement des approches de modélisation intégrées pour la ville avec la volonté de mieux caractériser les impacts et les risques à l'échelle des populations pourrait bénéficier du développement de l'intelligence artificielle (IA) pour représenter les impacts à très fine échelle à partir de modèles de plus grande échelle.

PRIORITÉS ET RECOMMANDATIONS

En ce qui concerne le milieu urbain, la priorité est de procéder à une descente d'échelle, en modélisation et en observation, permettant de rendre compte des hétérogénéités intra-urbaines et des mécanismes de couplages avec le milieu extra-urbain, y compris le milieu marin côtier. Le développement de modèles intégrés pour la ville doit être encouragé tout en veillant au coût numérique, et donc environnemental, de la démarche. Un accès fluide aux données de la recherche, de l'opérationnel et aux données connexes utiles pour les études pluri-disciplinaires (données de santé et socio-économiques, données descriptives de la ville et de ses composants) est essentiel à tous les niveaux d'acteurs (académiques, institutionnels et citoyens). Un effort est attendu sur les moyens expérimentaux : renforcement du potentiel expérimental et du rôle de coordination des super-sites urbains, nouveaux moyens mobiles d'investigation, intégration des données participatives dans les bases scientifiques, missions satellitaires à haute résolution spatiale. L'objectif est d'améliorer nos connaissances à la fois sur les processus physiques et chimiques (parfois jusqu'à la micro-échelle) et biophysiques pour les surfaces urbaines et péri-urbaines, mais aussi sur les processus socio-économiques des villes. Pour cela, l'interface avec les acteurs académiques et socio-économiques en lien avec l'aménagement du territoire et la surveillance opérationnelle est essentielle et doit être mieux coordonnée. De même, il convient de renforcer le partage interdisciplinaire des pratiques et des expériences au sein de la communauté académique et des instituts de recherche.

Zones tropicales et intertropicales

LES ENJEUX

Les zones tropicales et subtropicales aux conditions météorologiques, climatiques et sociétales spécifiques constituent une aire aux enjeux scientifiques et sociétaux croisés. La plus grande partie de ces zones est couverte par les océans, mais aussi en domaine continental par des zones de végétations denses –importantes pour la dynamique et la composition atmosphérique–; zones peu accessibles, rendant les observations et le suivi à long terme nettement plus difficiles que dans les zones tempérées. Les données d'observation long terme restent toutefois indispensables à la prévision du fonctionnement du système climatique, et offrent un potentiel de développement critique pour le développement des défis scientifiques détaillés dans cette prospective.

Les recherches futures que la communauté OA souhaite développer en zone tropicale s'articulent autour de plusieurs axes scientifiques, notamment la convection profonde dans l'atmosphère – en lien avec le Défi «variabilité, tendances et points de bascule», la prévision des cyclones tropicaux à l'interface terre-mer ainsi que leur impact en zone côtière et littorale, la caractérisation de la variabilité climatique long terme et leurs interactions avec les aérosols anthropiques et biogéniques, pour mieux comprendre leur transport atmosphérique et leurs impacts (radiatif, physique, chimique) sur le climat. Les émissions et dépôts de composés depuis/ sur l'océan et les surfaces continentales sont également étudiés à travers le prisme du carbone et des émissions de GES- gaz à effet de serre- associées. L'objectif commun est de mieux comprendre les processus mis en jeu, leurs évolutions dans un contexte de réchauffement climatique et de mieux appréhender les impacts sur les populations et les écosystèmes, afin de proposer des solutions durables et adaptées à la société en mutation.

Cette recherche ne pourra se faire qu'en intégrant la notion de sobriété dans les travaux mis en jeu, et en ayant soin de les conduire en étroite collaboration/association avec les universités et instituts de recherche locaux afin de promouvoir le développement de capacités, le partage de connaissances à l'échelle académique mais aussi l'adhésion et l'implication des populations locales (voir *Mise en œuvre*).

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Les aérosols naturels et anthropiques (océanique, tellurique, biogénique) modifient les propriétés microphysiques/optiques de l'atmosphère et impactent la dynamique des nuages convectifs et des précipitations, ainsi que le cycle hydrologique dans les grands systèmes de mousson

notamment. La convection est un acteur majeur du cycle de l'eau et du bilan énergétique tropical, et les événements extrêmes sont exacerbés avec le réchauffement du climat. Le relief insulaire impacte les précipitations (à la Réunion ou dans le continent maritime notamment). Les nombreux aérosols absorbants en zone tropicale (feux de biomasse, aérosols désertiques, aérosols marins en zone côtière) et la forte teneur en vapeur impactent le développement de la convection atmosphérique (peu profonde & profonde et son organisation) en particulier en Afrique Centrale.

La prévision de la cyclogenèse dans l'Atlantique Nord-Est nécessite une bonne compréhension des interactions entre systèmes convectifs de méso-échelle, poussières et ondes tropicales. Les questions en suspens portent sur :

- les impacts de la charge de poussière sur les ondes (incluant d'éventuels effets non linéaires, et/ou effets de seuil) ;
- l'impact de la structure / croissance / propagation des ondes sur le transport zonal de poussière (en terme de distribution verticale ou de microphysique) ;
- l'effet (direct, semi direct, indirect) des aérosols sur l'évolution vers tempêtes tropicales / ouragans ;
- les outils à favoriser pour l'observation (satellite).

Dans les modèles climatiques régionaux et ceux dédiés à la prévision numérique du temps, **la représentation des interactions ondes tropicales** / convection atmosphérique, le déroulé du cycle de vie de la convection profonde et des événements de pluies extrêmes, la source de prévisibilité dans les ondes tropicales (meilleur précurseur que la pluie dans les modèles) doivent être améliorés. L'objectif étant de mieux comprendre, modéliser et prévoir les cyclones (via l'assimilation de données existantes et futures, et la synergie de validation modèles/mesures) dans un contexte global qui devrait voir l'intensification de ces phénomènes cycloniques en raison du réchauffement climatique (en particulier en zones tropicales sous l'effet de l'élévation de la température des masses d'eau océaniques). L'évolution de la vitesse de déplacement de ces cyclones tropicaux est une question d'importance vis-à-vis de leurs impacts potentiels (e.g., vitesse des vents et cumul de précipitation en un lieu donné), mais reste l'objet de vifs débats dans la communauté scientifique. Afin de mieux les caractériser, il convient de limiter les incertitudes sur les flux de chaleur mis en jeu et de préciser le lien houle / cyclone : l'étude des processus couplés océan/atmosphère s'avère indispensable pour en comprendre l'influence à l'échelle locale et à haute fréquence sur les phénomènes océaniques (canicules marines, tourbillons, upwelling, surcotes) et atmosphériques (événements précipitants intenses dans les zones côtières, cyclones tropicaux et «medicanes», dépressions, effet de



Immersion du carottier géant Calypso lors de la campagne Amaryllis (juin 2023) depuis le navire océanographique Marion-Dufresne. Avec une capacité de carottage en routine de plus de 50 mètres, le Marion-Dufresne de la Flotte Océanographique Française est un instrument unique au monde. Les carottes prélevées lors de la campagne océanographique Amaryllis documenteront la variabilité hydrologique tropicale du bassin de l'Amazonie.

© Anaïs Duhayon Photographie & IPSL

brise, phénomènes convectifs sur les îles, vagues de chaleur terrestre).

Pour mieux appréhender **l'impact radiatif des aérosols**, le rôle de la turbulence atmosphérique et des processus dynamiques de petite échelle dans les processus d'émission d'aérosols désertiques et leur transport, notamment pour les « grosses » particules et leurs impacts radiatifs reste une question majeure sur le continent africain.

La représentation des nuages bas et moyens en saison sèche dans les zones tropicales est nécessaire pour améliorer la modélisation des quantités de précipitations. La nébulosité, le rayonnement solaire en saison des pluies mais

aussi en saison sèche sont encore très mal documentés alors que nuages bas et moyens contribuent fortement à la modulation du bilan radiatif, à la disponibilité en lumière et à la demande en eau pour la végétation.

Les « *rivières de fumée* », de plusieurs centaines de kilomètres de large (issus des feux de forêts tropicales) et avec de très fortes épaisseurs optiques, transportent des quantités massives d'aérosols et de gaz en basse troposphère vers le sud-ouest de l'océan Indien et jusqu'au sud-est de l'Australie, avec des impacts potentiels importants pour le bilan radiatif et la productivité marine de la région, et des impacts sur des variables climatiques clés comme la température de surface de l'océan que les modèles ont du mal à reproduire. Ces épisodes de méga feux risquent d'être plus fréquents dans le contexte du réchauffement climatique. Par pyroconvection, ces événements extrêmes sont susceptibles d'injecter des quantités très massives de matière jusque dans la stratosphère, à l'image des éruptions volcaniques suffisamment explosives, impliquant des incertitudes sur le contenu en aérosols au sein de la tropopause tropicale-TTL.

Il est nécessaire de représenter correctement les stratocumulus sur les bords Est des océans tropicaux et le couplage fin entre rayonnement, microphysique et turbulence, encore très difficiles à représenter dans les modèles.

Des observations complémentaires sont nécessaires pour mieux définir l'origine des représentations spatiales des tendances climatiques des précipitations en Afrique de l'Ouest. Quantifier les conditions, périodes d'occurrence et conséquences des points de bascules d'éléments du système climatique (e.g. régimes sec/humide de la mousson africaine) pourrait permettre de mieux prédire l'évolution des ressources en eau en Afrique sub-saharienne sous différents scénarios à travers l'approche couplée « Cycle de l'Eau et Changement Climatique », et de comprendre les modifications potentielles au niveau du cycle de l'eau (mousson, événements extrêmes type cyclones, tempêtes tropicales, sécheresse, et impacts associés). L'étude de l'évolution du climat au Sahara/Sahel et des poussières Sahariennes peut bénéficier des séries temporelles passées (e.g. AMMA) et des derniers cycles climatiques (variabilité climatique rapide et d'échelle orbitale).

Les liens entre **pollution, chimie atmosphérique et transport des polluants vers la haute troposphère** doivent être renforcés. En surface, la pollution atmosphérique dans les grandes villes africaines, et son impact sur la santé humaine sera abordé via plusieurs approches déclinées à la croisée des défis anthropisation et de l'aire prioritaire sur l'urbain (ex. sciences participatives, modélisation haute résolution, et mesures long terme des concentrations de gaz et de particules pour de lier l'aspect sociétal et économique aux études de qualité de l'air). Dans les grandes villes en Inde et en Chine, la pollution

atmosphérique est également un fléau mais les études de physico-chimie atmosphérique restent encore peu développées dans la communauté OA dans ces zones en surface. Un rapprochement avec la communauté SIC (dans les observatoires existants) permettrait de renforcer cet aspect, en lien avec le PPR Outre-Mer.

Le transport de masses d'air troposphérique vers la stratosphère en régions tropicales est à l'origine de l'acheminement d'un grand nombre d'aérosols, de vapeur d'eau et d'ozone à grande échelle. Dans la TTL (Tropical Transition Layer, barrière dynamique entre la troposphère et la stratosphère), de nombreux mécanismes de transport sont encore mal établis, et complexifiés par des processus multiphasiques et microphysiques peu étudiés, tels que la formation de cirrus qui joue un rôle important dans l'assèchement de la stratosphère, ou bien la convection profonde qui affecte la composition chimique de cette TTL. L'analyse de la redistribution des polluants, et notamment de l'ozone en lien avec la mousson ouest africaine nécessite des études dédiées en termes de modélisation à grande échelle, mais également grâce aux observations. L'influence de la convection profonde et des LiNOx sur la composition de la troposphère et de la haute troposphère - basse stratosphère (UTLS) dans les régions de mousson (asiatique, africaine) pourra être explorée grâce aux observations IAGOS et IASI et simulations à l'échelle régionale.

Les observations dans la TTL (*in situ* et télédétection) doivent être renforcées et/ou portées dans les zones tropicales via des initiatives de structuration comme celles qui existent à l'échelle européenne. Les projets KADI (Knowledge and Climate Services from an African Observation and Data Research Infrastructure), et OBS4CLIM (Système d'observation intégré pour l'atmosphère) par exemple, mais également les projets adjoints à ICOS, ACTRIS, IAGOS ou NDACC et GRUAN portent des initiatives en ce sens.

Le couplage entre océan physique, biogéochimie, cycle du carbone et écosystèmes est une condition de base importante pour l'étude des déterminants abiotiques de la diversité planctonique et du lien entre assemblage planctonique et flux biogéochimiques (apport des omics, analyse des organismes biologiques). La dynamique des océans, impactée par le réchauffement, est en interaction avec l'atmosphère, donnant lieu à des événements extrêmes (moussons, cyclones, vagues de chaleur terrestre ou marines) souvent associés à des modes climatiques interannuels (ENSO – El Nino Southern Oscillation; IOD – Indian Ocean Dipole, mode équatorial/méridien Atlantique). L'étude de la dynamique et de la variabilité spatio-temporelle des courants passe par la compréhension des mélanges de masses d'eau et la contribution des forçages atmosphériques. Des travaux seront nécessaires pour en mesurer les conséquences sur la circulation locale et globale, sur la biodiversité (en lien par exemple avec les micro plastiques et la grande gyre), et les échanges entre océan et atmosphère.

En termes d'apports de nutriment, les aérosols désertiques une fois soulevés vont se déposer sur les océans, et quantifier leur biodisponibilité en tenant compte du vieillissement reste une question majeure pour les organismes biologiques dans l'océan et les réémissions de bioaérosols vers l'atmosphère.

La compréhension du fonctionnement et de la variabilité de la pompe océanique de carbone nécessitent des études spécifiques en zone tropicale, notamment dans l'océan Indien, très sous-échantillonné en termes de CO₂, d'impact anthropique, et dont les effets sur les coraux sont à documenter. Le lien entre observation (biogéochimie, météorologie) et modélisation (prévision, suivi des changements) doit être renforcé par des séries temporelles longues, qui pourront s'appuyer sur des développements méthodologiques (voir section instrumentation).

Documenter les cycles du carbone et de l'azote (stockage et transfert) nécessite de travailler aux interfaces, zones privilégiées des échanges entre surface et atmosphère. Les flux de matière et d'énergie aux interfaces et dans les écosystèmes restent encore peu étudiés en zone tropicale. Le cycle du carbone dans les forêts tropicales est ainsi imparfaitement connu, que ce soit dans le climat actuel ou à venir. De la même façon, les cycles du carbone et de l'azote dans les écosystèmes de savanes ou dans les agro-systèmes n'ont fait l'objet que de peu d'études en zone tropicale, en Afrique notamment. Une meilleure estimation des différents flux (carbone par exemple) à l'échelle locale, régionale voire globale, passe par la mise en place d'études plus approfondies et plus diversifiées sur différents types d'écosystème (voire d'observatoire à long terme).

Quels sont en particulier les impacts des pratiques agricoles, de l'élevage, et du dépôt de composés azotés sur ces flux d'échange ?

Comment ces flux évolueront dans les décennies à venir dans le contexte du changement climatique (augmentation de température, changement de régime pluviométrique) ? Les fleuves, les réservoirs hydroélectriques, les zones côtières, les mangroves, les marais littoraux, les estuaires, les zones intertidales... sont-elles/ils actuellement des zones qui accumulent (sédiments) ou perdent du carbone (sous forme de CO₂, CH₄) ? Comment ces zones stockent-elles ou transforment-elles le carbone continental et sur quelles échelles de temps ? Comment ces flux de carbone et d'autres éléments (soufre et contaminants par exemple) évolueront à l'avenir dans un contexte de réchauffement et d'augmentation des événements extrêmes (crues...), ou à l'échelle régionale, de pression démographique plus forte ? Ces questions peuvent être étudiées dans un grand nombre de zones géographiques tropicales : Guyane et autres territoires d'outre-mers pour les mangroves, Afrique de l'Ouest (lagunes côtières), Amérique du sud (fleuve Amazone et zones de minimum d'oxygène Pérou-Chili, Mexique), Asie

(Baie du Bengale, Mékong, Fleuve Rouge). Ces axes d'étude nécessitent de s'appuyer ou de mettre en place des collaborations avec les organes de recherches sur site (locaux ou nationaux) et d'impliquer les populations locales le cas échéant.

Comprendre la variabilité climatique intertropicale, particulièrement en période chaude, nécessite également **d'interroger les archives paléoclimatiques longues**, à la lumière de nouvelles approches permettant d'explorer les échelles de temps saisonnières, interannuelles et plus longues échelles de temps. Le Marion-Dufresne, avec ses capacités de carottage inégalées dans le monde, offre la possibilité de recouvrir des sédiments d'intervalles de temps pertinents pour les enjeux actuels, comme la transition mi-Pléistocène, les interglaciaires chauds fin-Pléistocènes afin de documenter un état climatique à l'équilibre lors de périodes plus chaudes qu'à l'actuel. Une série de campagnes océanographiques fédérant les laboratoires français, initiées au sein du Livre blanc Paléoclimat et Paléoenvironnement, visent à mieux documenter les modes de variabilité climatique, dans l'océan Indien (IOD), dans l'océan Pacifique (ENSO), et permettront d'explorer la réponse dynamique du système couplée océan-atmosphère aux déterminants que sont les forçages orbitaux et rétroactions, mais également les forçages liés aux événements extrêmes comme les méga-éruptions volcaniques.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

Les outils d'observation de la communauté océan-atmosphère (SNO, IR, IN), essentiels au suivi long terme de variables clés, sont implantés dans la zone tropicale depuis plusieurs années, et ont permis de renforcer l'efficacité de la recherche dans les pays du sud. Ces dispositifs doivent être articulés au mieux avec les autres instituts français présents sur le terrain, dont l'IRD, et également avec les dispositifs locaux existants ou en voie d'exister (par exemple par la structuration d'IR africaines, projets KADI, OBS4CLIM). Avec ces séries temporelles qui permettent un suivi en temps quasi réel de l'évolution des composés mesurés (et une mise en alerte le cas échéant), il s'agit aussi d'être en mesure de mieux contraindre des modèles, de mieux comprendre les processus mis en jeu, ou de valider des mesures par télédétection. Les installations pérennes permettent par exemple de mettre en place le suivi des gaz à effet de serre, des gaz polluants (NOx, COV...) et aérosols (carbone suie, particules...), données qui peuvent ensuite être utilisées pour évaluer l'impact des politiques d'atténuation (le cas échéant) sur la qualité de l'air ou les émissions fossiles dans les régions tropicales très impactées. L'augmentation récemment observée des concentrations de CH₄ a renforcé l'idée qu'il fallait développer et mettre un accent particulier sur l'observation de ce composé dans les tropiques (réseaux, télédétection, campagnes) afin de réduire fortement les incertitudes concernant les émissions de méthane par les sources dans ces régions très émettrices.

Les sites d'observation existants peuvent/doivent fédérer différentes activités, ce qui permet des économies d'échelle (sobriété, efficacité), et développer des synergies transdisciplinaires. Plusieurs sites en zone tropicale en sont le témoin, et permettent également des collaborations approfondies avec les partenaires locaux (universités, collectivités). Dans le cadre du projet OBS4CLIM qui vise à soutenir et à renforcer les observations de long terme sur les concentrations et les émissions de surface des composés atmosphériques d'intérêt climatique à partir des plateformes sol et des avions commerciaux instrumentés, un focus particulier est mis sur les zones tropicales et subtropicale avec les sites de Lamto (Côte d'Ivoire), de L'OPAR (La Réunion) mais aussi le site de l'île Amsterdam qui verra ses infrastructures et ses moyens d'observation renforcés via ce projet. L'île Amsterdam, bien que située en marge de la zone subtropicale se situe dans une zone d'échanges avec les tropiques en milieu non anthropisé, idéale pour l'étude de la composition atmosphérique (panaches de feux, gaz à effet de serre), des processus physico-chimiques en milieu marin (échanges océan atmosphère) et des forçages radiatifs. Elle dispose déjà des plus longues séries de mesure de CO₂ de l'hémisphère sud. La mise en synergie des observations sur l'île de La Réunion, l'île Amsterdam et les observations faites à bord du navire Marion Dufresne (MAP-IO) permettrait de faire de cette zone de l'océan Indien sud une zone d'étude privilégiée avec des observations haute précision et hautes fréquences unique. Couplé avec des travaux de modélisation, les résultats devraient permettre d'améliorer la compréhension des processus, qu'il s'agisse des cyclones, des phénomènes de convection dans l'atmosphère et/ou dans l'océan et de renforcer les capacités de prévisions à l'échelle locale.

RECOMMANDATIONS

Il s'agit ici d'étudier **l'homme en lien avec son environnement** dans un contexte d'évolution rapide de celui-ci. Les démarches allieront des études d'impact, d'atténuation, d'adaptation, de préservation des ressources et d'exploitation soutenable du milieu. Il s'agira par exemple de **concevoir des stratégies d'adaptation** face aux évolutions climatiques et aux risques hydro-climatiques (inondations, cyclones...). Dans le cas de La Réunion par exemple, il faudra étudier la résilience insulaire face aux aléas climatiques et aux catastrophes naturelles. Dans le cadre de projets régionaux sur l'Océan Indien, la dimension sociétale face au risque naturel et ses impacts doit être développée. De tels **projets** deviennent **interdisciplinaires** par essence, regroupant outre les laboratoires de recherche sur l'environnement géophysique, des économistes, des juristes, des représentants de la société civile et de ses institutions, des représentants d'organismes de secours (Croix-Rouge, etc.), des représentants des collectivités locales et des décideurs, vers lesquels nous devons traduire et transmettre nos résultats de recherche fondamentale efficacement et de façon intelligible. Le PEPR Bridges en est l'illustration. Il

faut donc aller vers plus de **science de la durabilité**, c'est-à-dire étudier l'homme dans son environnement en prenant en compte toutes les dimensions de la problématique. Un **rapprochement et une harmonisation CNRS-IRD** en ce qui concerne les pays du sud nous paraissent souhaitables, qui permettraient de tirer le meilleur profit des approches souvent complémentaires menées par les deux organismes. En Afrique, des stratégies d'adaptation face aux changements environnementaux sont attendues par les populations. Dans les zones rurales, il y a une nécessité de combiner sciences de l'environnement (étude des échanges atmosphère et zone critique), acteurs de la société et parties prenantes (communautés d'agriculteurs, décideurs) pour co-construire des solutions concertées d'adaptation des systèmes agricoles, pour garantir et préserver la santé des populations et des écosystèmes, et un accès à une alimentation pour tous. Dans les villes, il faudra trouver des solutions pour réduire les risques sanitaires et sociaux liés à la pollution de l'air (à travers des scénarios d'atténuation des émissions de polluants) et évaluer les impacts sur le climat régional et urbain. Cela ne pourra se faire qu'avec une **recherche participative**, en s'appuyant sur des mesures **low cost** quand elles sont adaptées et pertinentes (**en complément de réseaux haute précision le cas échéant**). À l'échelle de la zone intertropicale, l'impact du changement climatique sur la santé des populations via le développement des maladies à transmission vectorielle (paludisme) devra être suivi et étudié avec attention.



Image du déploiement à Qikiqtarjuaq (Nunavut, Canada) d'un flotteur ARGO-BGC (BioGéoChimique) pour des tests de validation au froid en mode captif au camp de glace du projet GREENEDGE.

Plus de vingt de ces flotteurs ont ensuite été déployés en Arctique, Baie de Baffin, projet GREENEDGE. Equipés de nombreux capteurs physiques et bio-optiques, ils mesurent les paramètres (océanographiques) environnementaux entre 0 et 1000/ 2000m. Ce sont des outils indispensables pour comprendre le mécanisme des blooms phytoplanctoniques en Arctique car ils fournissent des séries temporelles y compris durant l'hiver où la zone est inaccessible au brise-glace scientifique. Ce flotteur supporte un prototype de détecteur de glace par laser.

© Claudie Marec / IUEM / CNRS Images

Les régions polaires présentent un environnement extrême, aux températures moyennes annuelles négatives. Depuis les régions boréales couvertes de neige l'essentiel de l'hiver et ses sols gelés en permanence (pergélisol), les calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique, la glace de mer en surface des océans polaires, la cryosphère est quasi omniprésente et caractérise cet environnement. Connues pour receler en leur sein le témoignage de la composition atmosphérique enregistrée dans les glaces de l'Antarctique comme du Groenland, les régions polaires sont également des régions clés du système climatique. À titre d'exemple, les plongées d'eau dense dans les océans polaires sont le moteur de la circulation océanique profonde, re-distribuant chaleur et nutriments à l'échelle globale; les calottes polaires régulent le niveau moyen des océans et retiennent aujourd'hui plus de 60 mètres d'équivalent niveau des mers. Les régions polaires s'avèrent en outre particulièrement vulnérables au changement climatique, un réchauffement 4 à 7 fois plus important que la moyenne globale a été observé. Les changements environnementaux observés depuis plusieurs décennies sont considérables.

LES ENJEUX

Les régions polaires sont des **récepteurs de la pollution atmosphérique, océanique et terrestre** venant des latitudes moyennes. Les sources locales de pollutions en Arctique augmentent par ailleurs largement en lien avec le développement d'activités anthropiques ou le changement climatique lui-même (ex. feux boréaux). La pollution, y compris les contaminants, a des impacts sur les écosystèmes et la santé des espèces et des populations locales.

L'extension et la durée du **couvert nival** diminuent, augmentant l'albédo moyen de la surface et amplifiant le réchauffement localement. Le **pergélisol fond**, impactant les structures et relarguant les gaz à effet de serre séquestrés dans les sols gelés, contribuant alors à amplifier le réchauffement climatique. La **fonte de la surface des calottes polaires** a augmenté, nombre de glaciers émissaires ont accélééré si bien que les calottes polaires contribuent à élever le niveau moyen des mers de l'ordre de 1 mm/an alors qu'elles étaient proches de l'équilibre au cours du XX^e siècle. Cet afflux d'eau douce affecte les propriétés de l'océan, sa circulation et ses écosystèmes.

La **banquise arctique** voit son épaisseur comme son extension diminuer depuis plusieurs décennies laissant présager une disparition du couvert de glace durant l'été dans les toutes prochaines décennies, ouvrant progressivement des voies navigables dans l'océan Arctique et modifiant les échanges entre l'océan et l'atmosphère et affectant également la circulation de l'océan et de l'atmosphère et les écosystèmes marins.

Les **océans polaires** subissent des transformations profondes: changements de circulation, de distribution des

contenus en chaleur et eau douce, dont on évalue encore mal les mécanismes de contrôle et les impacts potentiels sur la cryosphère et la circulation océanique de retournement (AMOC).

Comme esquissé ci-dessus, ces altérations environnementales affectent l'atmosphère, les surfaces continentales, l'océan, modifie le cycle du carbone, les cycles biogéochimiques et interagissent entre elles par nombre de rétroactions positives. Certains systèmes géophysiques présentent très vraisemblablement des points de basculement, les calottes polaires pouvant s'emballer et se retirer irrémédiablement sur de vastes régions pour un réchauffement global de plus de 2 degrés, élevant alors le niveau marin de plusieurs mètres en quelques siècles. Ces points de bascule peuvent interagir en cascade, le relargage d'eau douce issue d'un démantèlement des calottes pouvant affecter la circulation de retournement dans des proportions qu'il reste à préciser. Les altérations environnementales observées aujourd'hui dans les régions polaires sont bien les prémices de potentiels bouleversements climatiques majeurs aux conséquences globales.

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Pour chacune des composantes du système climatique, de nombreux verrous scientifiques limitant nos capacités d'anticipation de l'évolution des régions polaires subsistent et nécessitent une attention plus particulière.

Les enregistrements des carottes de glace polaire renferment encore nombre de connaissances fondamentales pour améliorer notre compréhension du climat, depuis les changements de rythmes des transitions glaciaires/interglaciaires ou la documentation de la variabilité récente du climat et du cycle hydrologique atmosphérique. Parmi les questions clés en paléoclimatologie, les mécanismes entraînant la transition du Pléistocène moyen vers les grands cycles glaciaires/interglaciaires restent encore méconnus. Quelles étaient les concentrations en gaz à effet de serre au début du quaternaire? quels forçages ont prédominé cette transition?

En régions boréales, les sources naturelles de gaz à effet de serre (ex. zones humides, pergélisols) comme celles d'origine anthropique nécessitent d'être mieux quantifiées, tout comme le rôle des feux boréaux, sources majeurs de particules et gaz.

Plus généralement, les sources lointaines comme local de pollution et de contaminants (aérosols, ozone, mercure, microplastiques...) nécessitent d'être précisés dans les différents compartiments tant leur impact sur les écosystèmes et la santé en Arctique sont importants.

Les interactions aérosols-nuages, en particulier dans les nuages de phases mixtes, restent mal comprises et affectent notablement les estimations du bilan radiatif.

Le transport de chaleur depuis les moyennes latitudes à travers les rivières atmosphériques notamment reste à préciser tant leur impact sur le bilan de masse de surface des calottes polaires est important.

L'analyse et la modélisation de la neige et de ses rétroactions sur les bilans d'énergie et de masse de surface, la couche limite atmosphérique (neige soufflée, bilan radiatif, flux turbulents, couches stables) et le climat (albédo) devront être approfondies ; les mesures physiques (rugosité surface, albédo, redistribution par le vent), doivent être complétées par des approches chimiques et isotopiques indispensables à l'estimation de la sublimation et des processus de diffusion dans le névé. Les mesures hydrologiques de terrain devront s'accompagner et servir de validation pour des modélisations innovantes, qui seront insérées dans les modèles atmosphériques régionaux et globaux de la communauté.

L'évolution de la dynamique des calottes polaires en réponse aux forçages atmosphériques comme océaniques, restent l'incertitude majeure des projections de niveau des mers pour les prochains siècles. Nos progrès en ce sens dépendent de notre capacité à mieux observer, comprendre puis représenter dans les modèles numériques les interactions atmosphère/calotte/océan, les processus glaciologiques d'endommagement, de vêlage et de glissement basal.

L'amélioration de la description de la banquise (physique multi-phases, mécanique, hétérogénéité des types de glaces, biologie) et de ses couplages avec l'atmosphère et l'océan seront indispensables à de meilleures prévisions de son couvert et la réduction des incertitudes sur les scénarios climatiques futurs.

Les cycles biogéochimiques en régions polaires sont bouleversés par les changements environnementaux en cours comme l'acidification des océans, altérant la pompe biologique et la structure des réseaux trophiques dans des proportions qu'il reste à quantifier. La production primaire est impactée par les changements du couvert de glace de mer arctique, qui influence la luminosité et la dynamique des couches de surface océaniques. La fonte de la glace continentale et du pergélisol et la modification des flux terre-mer d'eau douce auront des impacts sur la turbidité des eaux, les cycles biogéochimiques et les réseaux trophiques dans des zones côtières. Le cycle des éléments issus de la fonte de glace, par exemple le fer limitant principal de la production primaire australe, restent mal compris.

Les processus contrôlant la circulation et les transformations de masse d'eau sur les plateaux continentaux antarctiques et dans l'océan Arctique doivent être mieux compris en renforçant l'effort d'observation y compris sous la glace (cavités sous glaciaires, régions de banquise) et en améliorant leur représentation dans les modèles de climat. Il s'agit aussi d'affiner notre compréhension des voies d'échange de

la chaleur et de l'eau douce entre ces régions et l'océan global, pour évaluer l'impact des changements observés sur la variabilité de l'AMOC et sur les interactions air-mer(-glace).

Si chacune des composantes du système climatique en région polaire continue à avoir des verrous à la connaissance qui lui sont propres, les interactions et rétroactions entre les différents compartiments sont la clé de notre capacité à anticiper certains impacts globaux du changement climatique tel que l'élévation du niveau des mers. Par ailleurs, certains objets d'études se font en collaboration avec d'autres domaines de l'INSU (ex. le pergélisol), ou avec d'autres instituts du CNRS (ex., recherche sur le vivant via l'INSB et l'INEE, recherche impliquant les socio-écosystèmes avec l'INSHS). Enfin, les savoirs écologiques traditionnels en région Arctique sont une source indispensable de connaissance sur la « santé » de cette région fragilisée par le changement climatique et la recherche en partenariat avec les SHS et/ou populations locales sont à encourager. Tout cela appelle naturellement à renforcer les synergies pluri et trans disciplinaires pour mieux comprendre les processus aux interfaces en particulier, mieux les représenter dans nos modélisations du système Terre, et ultimement contribuer à l'émergence des services climatiques. En termes de campagne d'observations, amplifier nos synergies collaboratives offre en outre l'évidente opportunité d'optimiser nos ressources humaines, matérielles et minimiser notre impact environnemental dans cet environnement fragile.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

La communauté nationale est largement reconnue pour sa grande expertise en termes de développement instrumental en milieu extrême et de leur implémentation en région polaire, comme pour sa capacité à maintenir des systèmes d'observations climatiques pérennes. À titre d'exemples, la plateforme française de Forage Glaciaire (F2G) offre à la communauté une compétence unique à extraire des carottes de glace en Antarctique comme au Groenland ; le programme SURVOSTRAL permet de suivre depuis plus de 30 ans le contenu thermique de l'océan dans les premiers 800 m et la salinité de surface entre la base de Dumont D'Urville et Hobart, formant la plus longue série temporelle des variations saisonnières et interannuelles de ces paramètres dans l'océan Austral. Nos capacités d'observations sont aujourd'hui largement rendues possibles à travers le soutien privilégié de l'Institut polaire français Paul-Émile Victor (IPEV), facilitant l'accès au terrain, tout particulièrement dans les bases dont il a la gestion (Svalbard, sub Antarctique, Dumont D'Urville et Dôme C en Antarctique). Les bases françaises en Terre Adélie sont particulièrement stratégiques, unique accès à une région de l'Antarctique de l'Est reconnue comme vulnérable au changement climatique et susceptible de voir des incursions d'eau océanique chaude déstabiliser les glaciers du secteur. L'accès aux autres régions de l'Antarctique et l'Arctique terrestre est dépendant de nos collaborations internationales pour per-

mettre de bénéficier des infrastructures et de la logistique de nos partenaires. L'accès à l'océan Arctique est, quant à lui aussi, très contraint du fait du manque d'infrastructure nationale (brise-glace de recherche) qui oblige les équipes de recherche à s'orienter vers des alternatives aujourd'hui peu satisfaisantes (nombre de jour-mers ou équipement scientifiques très limités) au travers de collaborations ou de plate-formes d'opportunité.

Les collaborations internationales sont essentielles pour les autres campagnes de terrain (mutualisation d'avion, accès aux stations des partenaires ou aux brise-glace de recherche). L'absence dans la FOF de navire polaire réduit néanmoins la capacité de la communauté française à s'insérer dans des programmes construits sur la mutualisation des moyens à la mer au niveau international. Nos capacités d'observations sont également substantiellement soutenues par le CNES, Météo-France et le CNRS facilitant notamment les mesures aéroportées et stratosphériques sous ballon en région polaire. La communauté française a aussi la possibilité de faire des campagnes de mesures aéroportées en Arctique avec le soutien de Safire (nouvel avion à plus longue portée). En ce qui concerne les observations depuis l'espace, la communauté s'illustre dans sa capacité à porter ou co-porter des missions spatiales (ex. IASI, CALIOP), développer des algorithmes pour traiter les mesures, puis l'analyse et la validation des données. Si la communauté a une très forte expertise en termes d'observation, elle est par ailleurs largement reconnue à l'internationale pour son expertise sur les paléoclimats et l'analyse des carottes de glace, la compréhension fine des processus de toutes les composantes du système climatique comme de leurs interactions et rétroactions. Finalement, la communauté est reconnue pour sa capacité à étudier et simuler des processus dans des modèles de complexité variées (des LES jusqu'aux modèles de climat).

Les infrastructures et programmes nationaux vont permettre de structurer une partie des actions de la communauté. À titre d'exemple, le PEPR TRACCS contribuera à améliorer nos capacités de développement et de maintenance des systèmes de modélisation du système climatique et plus particulièrement de la modélisation des calottes polaires et de la banquise ainsi que de leurs interactions avec l'océan et l'atmosphère. TRACCS n'est pour autant pas exhaustif, à titre d'exemple la modélisation de la chimie et des aérosols en zone polaire n'est pas couverte à ce jour et des financements complémentaires devront être trouvés. Cela n'en reste pas moins une opportunité fondamentale qui permettra d'agréger nombre de développements numériques et facilitera le positionnement de la communauté à l'international.

RECOMMANDATIONS

Renforcer la structuration nationale de la recherche polaire et optimiser l'accès aux moyens

Devant les difficultés et changements en cours, il apparaît nécessaire d'améliorer la coordination nationale des activités polaires afin de mieux mettre en synergie les différents acteurs, et développer et répondre aux opportunités nationales comme internationales. Un GT Allenvi Polaire en construction contribue à consolider cette structuration dans laquelle le domaine OA a toute sa place. En ce sens, l'opportunité pour la communauté de se rassembler autour d'un PEPR Polaire, ou de veiller à afficher des priorités polaires dans des initiatives plus larges comme cela s'est fait pour le PEPR TRACCS ou le PPR Océan, prendrait tout son sens.

Un des bénéfices d'une meilleure structuration serait d'optimiser par une mutualisation renforcée l'accès aux infrastructures de recherche, notamment celles mises à disposition par l'IPEV (ex. station Concordia, AWIPEV). L'IPEV est en effet la pierre angulaire de l'accès en région polaire pour une partie de la communauté nationale. Ses difficultés budgétaires et humaines actuelles, rendant délicat le plein achèvement de sa mission, mettent en danger la pérennité des activités d'observations et de certains suivis des changements environnementaux en Antarctique de l'Est. Il apparaît indispensable de consolider rapidement les capacités de l'IPEV sans quoi le risque de voir tout un pan d'activités de la communauté brutalement s'arrêter est élevé. L'IPEV n'a cependant pas la capacité de mettre en œuvre des campagnes de terrain ambitieuses hors du périmètre de ses infrastructures, notamment en Arctique et en Antarctique de l'Ouest.

Faciliter les moyens à la mer ou terrestres pour des campagnes pluri-disciplinaires essentielles en encourageant les collaborations bi- ou trans-nationales (le partenariat entre la FOF et Amundsen Science est de ce point de vue un des modèles à explorer) paraît un levier. Les structures internationales collaboratives du CNRS telles que l'IRL Takuvik au Québec ou le LIA en Sibérie sont par ailleurs des outils efficaces pour l'accès au terrain dans des secteurs géographiques difficiles d'accès par ailleurs. Cette réflexion sur l'accès aux moyens s'avère cruciale pour que nombre d'équipes ne soient pas bridées dans leur recherche faute de possibilité d'accès au terrain, mais aussi pour l'optimisation des moyens matériel, humain et la réduction de l'impact environnemental de nos activités. Elle doit être pleinement prise en compte dans la mise en œuvre de la Stratégie Nationale Polaire.

Développer de nouvelles expertises, moyens de modélisation et instrumentation dans le respect d'une politique bas carbone

Amplifier le développement de nouvelles instrumentations et mesures pour relever les défis de l'observation de régions difficiles d'accès (interfaces avec la glace, régions sous-glaciaires, courants près du fond, ...) ou des mesures autonomes, ponctuelles ou en continu, par drone, gliders, capteurs dérivants (atmosphère, sous-glace, océan) devient une nécessité tant pour améliorer la qualité de notre suivi, y compris la validation des mesures satellitaires, que pour faciliter l'évolution de notre pratique de terrain et minimiser son impact environnemental (voir la prospective instrumentale). Observations et modèles doivent relever le défi d'une description fine échelle des processus rendue nécessaire notamment par la forte hétérogénéité des milieux (couvert de neige, banquise, fronts océaniques, vagues, couche limite atmosphérique...) et l'importance des couplages à ces échelles (voir p. 51 « La variabilité interne de l'océan » et p. 72). Par ailleurs, la quantité de données, qu'elles soient issues des instrumentations de terrain, des mesures satellitaires ou de la modélisation, est en croissance exponentielle et les méthodes d'analyse évoluent très rapidement. Cela bouleverse les champs d'expertises nécessaires à nos applications et une vigilance plus particulière du renforcement des ressources humaines dans ces domaines spécifiques apparaît primordial.

Veiller à l'insertion de nos priorités de recherche dans les stratégies polaires internationales

Il est important que les priorités de recherche en OA qui résultent de nos prospectives trouvent un écho à l'international, dans des fora où s'établissent les grandes synergies de mise en œuvre de projets polaires (e.g., EPICA). Pour ce faire, les efforts de structuration nationale devront être conjointement associés à l'implication des équipes françaises dans les organisations internationales (e.g. le Scientific Committee on Antarctic Research ou l'International Arctic Science Committee, l'Arctic Monitoring and Assessment Programme) et dans les exercices de stratégie de recherche polaire qui y sont développés (e.g. ICARP IV 2025) avec en ligne de mire la préparation de la 5^e année polaire internationale (2032-33). Au-delà, il est important de soutenir les équipes nationales dans les collaborations internationales multipartites, l'implication dans les réseaux d'observation qui se mettent en place au niveau européen et international, et la participation à / coordination de projets Horizon Europe, et ce pour permettre la mise en œuvre de nos priorités via la mutualisation des ressources, y compris en facilitant l'accès aux régions sans soutien logistique national.

Fédérer autour de quelques grands enjeux de recherche interdisciplinaires

Le renforcement de la structuration nationale des activités polaires devra chercher à fédérer plus encore nos activités sur des régions d'intérêt spécifiques ou des thématiques/approches pluridisciplinaires à même de dépasser les verrous de connaissances identifiés (e.g. les interactions entre composantes en se focalisant sur le continuum air-glace-océan, les processus d'anthropisation des milieux, les liens entre forçages abiotiques et milieu vivant...). On veillera à maintenir une recherche qui permette d'apporter des réponses aux grands enjeux de société impliquant les pôles : impacts du changement climatique et niveau des mers, pollution, conservation, gouvernance, adaptation des populations locales.

Continuum continent-océan

L'océan côtier (du littoral au talus) est notamment caractérisé par sa position d'interface (continent/océan/atmosphère/anthroposphère) et la faible profondeur de sa colonne d'eau le rendant particulièrement sensible à l'anthropisation. Il en résulte une circulation des eaux et des flux de matières d'une grande intensité, une large diversité d'écosystèmes et d'habitats sur un faible espace (respectivement à l'échelle de l'océan global et à l'échelle d'un écosystème) et enfin un forçage anthropique fort qui s'interconnecte avec un forçage naturel lui aussi fort, d'origines continentale, océanique comme atmosphérique. Sa complexité, sa forte dynamique (intensité des flux de matière et d'énergie), la forte variabilité spatiale (à très petite comme à large échelle) et temporelle (événements extrêmes, variabilité saisonnière, évolution pluri-décennale) de cette dynamique confèrent à l'océan côtier un caractère unique dans le fonctionnement de l'océan global.

L'étude de cet océan et du continuum littoral-océan répond à de très nombreux enjeux scientifiques et sociétaux liés à l'élévation du niveau de la mer, l'évolution du trait de côte et des risques d'érosion-submersion, le réchauffement climatique et ses conséquences, la capacité de l'océan côtier à piéger le carbone anthropique, l'acidification des eaux, la pollution et la capacité de l'océan côtier à 's'épurer', la stabilité des écosystèmes sur le long terme.

LES QUESTIONS SCIENTIFIQUES

Plusieurs verrous scientifiques clés ont été identifiés par la communauté, et doivent faire l'objet de notre attention. Le premier porte sur le niveau de la mer et la morphologie littorale. Malgré les travaux importants déjà menés lors des années précédentes, il est nécessaire de mesurer, comprendre et prévoir les variations régionales du niveau de la mer afin de détecter les modes climatiques (de l'événementiel à l'interannuel) qui impactent les littoraux, de quantifier ces impacts sur la morphodynamique du littoral et en particulier les risques d'érosion et de submersion et de détecter les mécanismes de résilience des côtes face aux pressions climatiques et anthropiques.

L'étude du transport et du devenir de l'eau et de la matière associée (matière particulaire et dissoute), doit permettre de mieux comprendre les interactions d'échelles spatiales, la connectivité et l'impact des flux sur le fonctionnement des écosystèmes non seulement le long du continuum estuarien – systèmes côtiers – plateau continental – océan ouvert/océan profond mais également le long du littoral entre systèmes côtiers adjacents. Il sera nécessaire d'identifier, parmi les processus connus, ceux agissant à des échelles temporelles courtes (événementielle et saison-

nière, incluant les événements extrêmes) mais aussi longues (décennales à centennales). Il faudra pour cela s'appuyer sur les observations *in situ* et satellitaires ainsi que sur la modélisation numérique et ainsi mettre en place les observations permettant de paramétrer ces processus dans les modèles. Il sera également nécessaire de mettre en place des mesures afin de comprendre les processus de transferts de matière et d'éléments, dont les polluants et contaminants, entre les compartiments dissous et particulaire (incluant e.g. les floculats) et ainsi de mieux paramétrer les modèles.

Le rôle des espèces ingénieuses essentielles au couplage physique-biogéochimie-biologie en zone peu profonde doit être mieux contraint. Par définition, les espèces ingénieuses sont des espèces qui, par leur seule présence, modifient le fonctionnement de leurs écosystèmes. Ce sont souvent des espèces dont la seule structure physique crée un nouvel habitat. L'influence de ces espèces ingénieuses sur le fonctionnement physique et biogéochimique des écosystèmes peu profonds (incluant les zones intertidales) est encore peu étudiée et mal connue. Il sera donc nécessaire d'étudier le rôle des structures formées par ces espèces ingénieuses (mangroves, herbiers, forêts de macroalgues, récifs d'huîtres, structures coralliennes, bancs de maërl, champs de haploids, etc.) sur l'hydrodynamique, l'hydrodynamique sédimentaire et les flux biogéochimiques dissous et particulaires. Concernant ces derniers flux, il s'agira notamment de quantifier le rôle de ces structures dans le piégeage du carbone particulaire et dans les flux de carbone dissous et de nutriments (incorporation/production, respiration/reminéralisation ; notion de carbone bleu). Ces travaux permettront également d'alimenter l'établissement de bilans de matière à l'échelle des écosystèmes. Il sera nécessaire d'inclure ces structures dans les modèles physiques et dans les modèles couplés physique/biogéochimie/biologie.

La quantification des **flux de matière et la réalisation de bilans de matière à l'échelle des écosystèmes** et à l'échelle d'un cycle annuel complet sont essentielles pour établir des bilans de matière à l'échelle de la planète. Il est d'autant plus essentiel de le faire pour les écosystèmes côtiers au vu de l'importance de l'océan côtier dans les flux globaux. Ces flux et ces bilans doivent être régulièrement réévalués en lien d'une part avec les avancées technologiques et d'autre part avec le changement global. Il s'agit des flux des éléments biogènes (C, N, P, Si, O, S, micronutriments) et de polluants/contaminants (métalliques et organiques dont plastiques) (voir Défi « Anthropisation et pollutions »). En particulier, les flux du matériel dissous relargués à partir des sédiments 'anciens' (échelle pluridécennale à centennale) sont actuellement mal connus, de même que la part piégée dans les estuaires. Concernant plus spécifiquement

les flux de carbone, il sera notamment nécessaire 1) de ré-évaluer les biovolumes et les relations carbone-biovolume des populations phytoplanctoniques naturelles et de mesurer les flux de carbone à l'échelle de la cellule et 2) de mieux contraindre la variabilité spatiale (à l'échelle des habitats ; à l'échelle des grands types d'écosystèmes côtiers) et temporelle (aux échelles événementielles et saisonnières) des flux des différents types de carbone (particulaire et dissous, organique et inorganique) en incluant spécifiquement le méthane en plus du CO₂ afin de 3) mieux identifier et quantifier les forçages naturels et anthropiques sur ces flux.

les services d'observation et les réseaux de surveillance. Cette mobilisation doit être poursuivie. Un des points clef sera, au-delà de l'identification des différents forçages aux trajectoires d'évolution des écosystèmes, de quantifier la part respective de ces forçages, qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle, locale ou globale, qu'ils agissent de façon directe ou indirecte, de façon diffuse ou subite (notion de changement d'état). Les modèles d'équations statistiques (e.g. modèles d'équations structurelles) semblent actuellement trop peu robustes pour permettre cette quantification de façon fiable. Il sera nécessaire de les rendre plus



Ecume sur une plage de la côte ouest de la Namibie. Le rôle des émissions biogéniques marines sur les côtes de l'océan Atlantique sur la formation de nouvelles particules d'aérosols, précurseurs de noyaux de condensation pour les nuages. Les micro-organismes contenus dans l'écume qui se forme le long du littoral océanique sont responsables de très fortes émissions de composés organiques volatiles dans l'air ambiant. Leur oxydation ultérieure par les processus atmosphériques conduit à la formation de composés peu volatiles qui condensent. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet AEROCLO-SA (Aerosol, RadiatiOn and CLOUDs in southern Africa).

© Barbara D'ANNA / LCE / CNRS Images

In fine, des bilans de matière devront être produits et/ou ré-estimés à l'échelle des écosystèmes côtiers et de leurs interfaces le long du continuum continent-océan mais aussi entre écosystèmes côtiers (connectivité entre écosystèmes) et plus largement à l'échelle de l'océan côtier et de ses interfaces avec le continent, l'océan ouvert/océan profond et l'atmosphère.

La communauté nationale 'océan' s'est largement mobilisée pour étudier **l'évolution décennale à pluri-décennale des écosystèmes côtiers** au cours des dernières années, grâce notamment aux séries chronologiques acquises par

robustes ou de créer les outils statistiques permettant cette quantification. Les études multi-écosystémiques, c'est-à-dire des études faites simultanément sur un panel d'écosystèmes soumis à des gradients de forçages, devraient permettre une meilleure déconvolution et une meilleure quantification de ceux-ci. Elles permettront également de comprendre si les trajectoires des écosystèmes sont similaires ou évoluent le long du gradient littoral-océan. Modéliser ces trajectoires d'évolution sera enfin nécessaire.

Ces travaux devraient représenter des jalons pour permettre de prévoir les trajectoires futures ou a minima de tester des scénarios d'évolution des trajectoires en fonction de scénarios d'évolution des forçages et ainsi anticiper au mieux la réponse de l'océan côtier et de ses écosystèmes au changement global. À terme, il devrait être possible d'estimer la capacité de résistance et de résilience des écosystèmes côtiers.

FORCES ET OPPORTUNITÉS

Les études menées par la communauté 'Océan' sur l'océan côtier sont disciplinaires, **pluridisciplinaires tout autant qu'interdisciplinaires**. Elles peuvent associer, en plus des physiciens, des sédimentologues et des biogéochimistes, des mathématiciens, des écologues et des biologistes ou encore des chercheurs issus des sciences humaines et sociales (géographes, historiens, juristes, économistes, sociologues, anthropologues...). En effet, cet océan sous forte contrainte anthropique est aussi une zone de forts enjeux sociétaux, rendant l'étude des socio-écosystèmes souvent indispensable. Par ailleurs, le continuum littoral-océan ne peut être étudié sans prendre en compte les activités et processus présents dans les bassins versants et dans les estuaires et donc englober son étude dans celle du continuum continent-océan. Les communautés SIC et OA doivent donc travailler de concert.

L'importance de l'océan côtier dans le fonctionnement de l'océan global ainsi que sa proximité au continent et le linéaire de côtes de la France continentale et ultramarine fait que la communauté académique française étudie cet océan depuis près de deux siècles. La diversité des « implantations » et des territoires en métropole et en outre-mer est aussi une force pour étudier des systèmes océaniques dans des contextes climatiques et géographiques différents, permettant une vision très complète du système. Près d'une trentaine de laboratoires et stations marines français sont ainsi distribués sur les côtes et toutes les unités de recherche du domaine Océan possèdent une composante côtière. Les recherches futures pourront également s'appuyer sur la complémentarité des approches incluant l'observation *in situ*, l'observation satellitaire et la modélisation. Actuellement, la communauté 'Océan' étudie activement l'océan côtier grâce notamment aux infrastructures nationales — l'IR* Flotte Océanographique Française et ses navires côtiers et de station, l'IR ILICO et les Services

Nationaux d'Observation qui y sont rattachés — mais aussi locales (moyens à la mer, observatoires) des laboratoires de recherche et de leurs tutelles.

Parmi les opportunités dont la communauté s'empare, le lancement de la nouvelle mission d'altimétrie satellitaire SWOT en décembre 2022 offre une continuité d'observation des eaux continentales à l'océan ouvert pour les études topographiques (voir encadré SWOT), et ce avec une communauté française très investie. De même, la mise en place relativement récente des missions satellites Sentinel permet l'acquisition d'images à très bonne résolution spatiale et spectrale, en particulier pour la couleur de l'eau. Enfin, la décennie des océans (UNESCO) et sa déconvolution nationale via le PPR 'Océan et climat – un océan de solutions' a permis dans la première vague, le financement de quatre projets impliquant directement la communauté côtière.

Si l'accès à l'océan côtier est *a priori* assez aisé grâce à sa proximité du continent et aux différents moyens à la mer (navires, embarcations diverses, drones et autres vecteurs) des contraintes majeures restreignent toutefois les études du plateau continental des écosystèmes à petits fonds.

Du fait de sa moindre accessibilité depuis le continent comparativement à la bande littorale, le **plateau continental** fait historiquement et en quelque sorte 'naturellement' l'objet d'un moins grand nombre d'études à travers les mesures *in situ*. Les mesures satellitaires au contraire permettent une bonne étude du plateau continental. Néanmoins ils sont limités à la surface de l'océan et à un lot de paramètres relativement restreint comparativement aux mesures *in situ*, même si l'instrumentation lidar, déployée sur navires, avions ou plateformes fixes, pourrait permettre d'étudier les flux de carbone dans les premières dizaines de mètres. Il en résulte que le plateau continental est sous-étudié. Or il représente la plus grande surface de l'océan côtier. Il est donc nécessaire de réaliser un effort d'étude et d'échantillonnage de cette zone en utilisant les différents vecteurs qui le permettent. Les avancées technologiques récentes et à venir concernant les drones et les gliders permettant d'embarquer plusieurs capteurs, voire des préleveurs, seront utiles pour cela. De même l'arrivée d'un navire semi-hauturier dans la Flotte Océanographique Française, s'il reste dans son dimensionnement initial, permettra un réel bond en avant pour des études *in situ* pluridisciplinaires et interdisciplinaires. Il permettra par exemple de mieux évaluer l'importance des zones de plateaux continentaux dans la production et le stockage de carbone et les flux biogéochimiques en domaine pélagique, en domaine benthique, à leur interface et à l'interface océan-atmosphère.

La difficulté d'étude **des zones de petits fonds** est liée d'une part à la très forte hétérogénéité spatiale à l'échelle infra-kilométrique voire métrique associée à une forte dynamique temporelle qui nécessitent la multiplication dans l'espace et dans le temps des mesures et des prélèvements pour

obtenir une représentativité correcte des zones d'étude, et d'autre part à la difficulté d'accès de certaines zones (e.g. mangroves) ou au contraire à la sur-fréquentation de certaines autres (activités économiques, touristiques et récréatives), rendant délicat voire impossible la mise en place de mesures automatisées. Par ailleurs les mesures satellitaires n'y sont pas encore toutes adaptées (proximité de la côte, résolution spatiale -excepté pour l'optique- et temporelle trop faible). De telles zones peu accessibles mais fortement représentées et présentant des enjeux scientifiques forts comme les mangroves devront également faire l'objet d'efforts d'étude et d'échantillonnage.

RECOMMANDATIONS

L'étude de l'océan côtier et du continuum littoral - océan doit pouvoir s'appuyer sur le tripode observation *in situ* / observation satellitaire / modélisation. Ce tripode doit pouvoir servir de base à la mise en place d'une stratégie nationale d'observation dont les prémices existent mais qui doit arriver à maturité dans les cinq ans à venir. Les trois communautés se connaissent mais leur synergie doit être renforcée. L'IR ILICO (Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière) est le lieu d'incubation et de définition de cette stratégie nationale en lien avec les IR dont il partage les interfaces : continentale avec eLTER, hauturière via le FROOS, et atmosphérique via ACTRIS. Le pôle de données ODATIS de l'IR DATA TERRA a également un rôle à jouer concernant la mise en synergie des jeux de données issus des observations et de la modélisation. Néanmoins, mettre en place une telle synergie implique généralement de manipuler des jeux de données hétérogènes de formats différents, avec parfois des référencements différents, sur des grilles qui peuvent être complexes afin de bien représenter les traits de côte, et pouvant représenter de gros volumes de données. Il est donc nécessaire de développer des outils numériques de plus en plus complexes et intégrateurs de traitement, interpolation, comparaison, visualisation. La mise en commun de tels outils représente un réel bénéfice en termes de gain de temps, d'échanges et d'acquisition de compétences. Les travaux menés à l'échelle nationale dans le cadre du PPR 'Océan et climat - un océan de solution' (e.g. projets MEDIATION, RIOMAR et FUTURE-OBS) en lien avec l'IR ILICO et ceux menés à l'échelle européenne (projets JERICO et travaux en vue de JERICO-RI) pourront nourrir ces réflexions tout comme le PEPR RIDGES. Celles-ci devront également porter sur des moyens à bas carbone et à faible empreinte environnementale. Une telle stratégie nationale d'observation devra posséder une vision intégrée de l'ensemble du continuum littoral-océan en prenant en compte la diversité des écosystèmes côtiers et dépasser les frontières disciplinaires des domaines océan-atmosphère et Surfaces et Interfaces Continentales, en tenant compte les forçages et impacts anthropiques via une ouverture aux SHS.

Mise en œuvre

POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE OA SUR LES GRANDS FONDS MARINS ET PROBLÉMATIQUE ÉTHIQUE

La recherche sur les grands fonds marins (colonne d'eau et fonds océaniques au-delà de 200 m de profondeur) représente un domaine d'intérêt croissant. Bien que cette région océanique reste la moins explorée de notre planète, elle joue pourtant un rôle essentiel dans la régulation du climat et la biodiversité. Les processus de fine et méso-échelle ont également un rôle mal compris et mal simulé sur le climat, via leur impact sur la circulation grande échelle et donc sur les bilans de chaleur à l'échelle planétaire. Cette zone, non-éclairée des océans, est également clé dans l'efficacité de la pompe biologique à carbone. Les grands fonds marins contiennent également des « ressources » potentielles qui attirent les convoitises de divers secteurs industriels.

La communauté OA peut jouer un rôle clé dans la recherche sur les grands fonds marins en combinant des observations *in situ* et des modèles numériques pour améliorer notre compréhension de ces écosystèmes uniques. Les études futures menées sur les grands fonds marins doivent être pluridisciplinaires et impliquer des experts dans les domaines de la biologie, de la géologie, de la physique et de la chimie.

L'observation à long terme des grands fonds marins est essentielle pour évaluer les impacts des activités humaines sur cet environnement fragile et pour éclairer les politiques de conservation et de gestion des ressources. Pour ce faire, les programmes d'observation à long terme (à travers les SNO du CNRS-INSU tels que Argo-France, MOOSE et les IR du MESR tel que EMSO-France) doivent être renforcés pour observer les écosystèmes et comprendre comment ils évoluent dans le temps.

En termes de développement instrumental, il est important de continuer à améliorer notre capacité à explorer et à étudier les grands fonds marins (y compris le rôle des sources hydrothermales), en incluant la capacité de prélèvements d'échantillons dans ces zones difficiles d'accès et/ou la définition de nouveaux proxy biologiques/biogéochimiques.

La recherche sur les grands fonds doit donc être poursuivie voire renforcée, car elle joue un rôle crucial dans la recherche fondamentale sur l'océan, tout en minimisant ses impacts potentiellement négatifs, en particulier sur le climat (émissions GES des navires). Il est donc recommandé de réfléchir à de nouvelles méthodes basées sur une réflexion quant à notre responsabilité liée aux émissions de CO₂ et notre responsabilité liée aux empreintes induites. Les écosystèmes profonds sont en effet extrêmement fragiles. Un suivi dans la durée des impacts liés à son activité d'observation est recommandé. D'autres recommandations sont également proposées comme de repenser les paradigmes méthodologiques (ex. nouvelles techniques de mouillage), d'envisager de nouvelles bonnes pratiques pour minimiser les impacts (ex. choix des matériaux), de limiter nos impacts polluants, de quantifier les impacts en coût carbone et les mettre en regard à d'autres pratiques, de développer des instrumentations low cost/faible empreinte carbone, de proposer des aires marines protégées (jusqu'à la pratique de la recherche scientifique en particulier dans des zones sensibles sur le plan anthropologique). Un effort de transparence et de communication est également nécessaire. Enfin, il est nécessaire de sélectionner des « super-sites » d'études en s'appuyant sur les sites d'observations existants, d'optimiser les campagnes océanographiques et de s'appuyer sur une structure institutionnelle lors de demandes privées/philanthropes/ONG.

Efficacité et sobriété

Responsabilité environnementale du domaine OA : une prospective charnière pour permettre à la communauté de s'engager dans une transformation profonde

Cette prospective couvre la période 2023-2028. La France s'est engagée à réduire de 40 % son empreinte carbone en 2030 (SNBC, référence année 1990), et atteindre la neutralité carbone en 2050. La profondeur et la complexité des transformations nécessaires pour réaliser ces engagements dans un contexte de contraintes énergétiques et écologiques conduisent à des remises en cause d'un modèle dominant (croissance dans un monde où l'énergie est abondante, marche du progrès techno-scientifique apte à solutionner tous les problèmes...) et font émerger de nouveaux paradigmes. Parmi eux, celui de sobriété ouvre de nouveaux compromis entre une notion de bien-être redéfinie, l'usage soutenable de ressources naturelles, et la préservation du vivant et de l'environnement. Le GIEC donne ainsi à la sobriété une place inédite dans son dernier rapport (IPCC, AR6).

Cette transformation suscite des débats et initiatives depuis plusieurs années dans l'ESR, en lien avec la transformation des pratiques de la recherche elle-même. C'est tout particulièrement le cas au sein de la communauté OA qui documente et alerte sur la situation climatique et environnementale depuis des décennies. L'implication de notre communauté dans le travail du collectif Labos1p5 sur les empreintes CO₂ de l'ESR et la généralisation rapide des calculs de ces empreintes par nos laboratoires du domaine océan-atmosphère du CNRS-INSU, témoignent de notre rôle d'éclaireur.

Le bilan carbone 2022 du CNRS, comme le bilan effectué par les autres organismes du domaine océan-atmosphère (par exemple Météo-France), ont permis de souligner l'importance des achats (73 % au CNRS) dans l'empreinte carbone des recherches. Si le calcul n'a pas encore été fait spécifiquement sur notre domaine, des actions de mutualisation des équipements (au cœur des dispositifs communautaires), de maintenance régulière des équipements pour garantir leur pérennité, et enfin de prise en compte du bilan carbone dans les critères de choix d'achat (et d'évaluation par les organismes et agences de moyen) apparaissent comme des leviers implémentables à court terme.

En sus de ce bilan carbone nécessaire, nos impacts potentiellement polluants ou nos impacts sur la biodiversité doivent être mieux pris en compte et intégrés dans nos démarches et pratiques futures. Nos communautés progressent rapidement vers un consensus quant à notre né-

cessaire participation à cette transformation écologique des pratiques professionnelles. La mise en œuvre de changements est difficile mais les évolutions liées tant aux niveaux, à la nature et aux modalités de cet engagement pourraient se faire rapidement. La présente réflexion prospective coïncide avec la sortie du rapport du comité d'éthique du CNRS (COMETS) sur la dimension environnementale de l'éthique de la recherche. Parmi ses recommandations figurent : la multiplication des espaces de discussion permettant à l'ensemble des personnels de l'ESR de débattre des enjeux et contours de cette responsabilité nouvelle ; le soutien et le développement par les instances de prospective scientifique des recherches permettant une meilleure mesure des impacts environnementaux (gaz à effet de serre, pollution, atteintes à la biodiversité, etc.) liés à de nouveaux champs de recherche ou à la poursuite des recherches en cours. À relativement brève échéance se profile l'obligation pour chaque établissement de l'ESR de définir et respecter un schéma directeur incluant des objectifs en termes d'émissions CO₂ et consommation d'énergie contribuant à l'objectif de neutralité carbone en 2050.

Les contributions, débats et travaux menés dans le cadre de cette prospective ouvrent de nombreuses voies de transformation des pratiques OA dont un certain nombre évoquées dans les recommandations issues des défis et aires prioritaires (les *Défis*; *Aires Prioritaires*), mais également des conclusions des Infrastructures de Recherche.

Parmi les premiers postes d'émission de GES des activités de terrain du domaine OA, l'utilisation des navires océanographiques figure au premier plan avec d'importantes quantités d'émissions de CO₂. Le renchérissement récent des hydrocarbures a de surcroît montré les dangers d'une dépendance aussi forte à ce type d'énergie pour nos observations. Des réflexions portant sur la décarbonation des navires et la sobriété de nos pratiques d'observations en mer doivent être engagées. La prospective opérationnelle de renouvellement des moyens à la mer de la FOF (2023-2024) à l'horizon 2035 doit en constituer le cadre. Ces réflexions portent sur des perspectives de progrès technologiques (amélioration des rendements moteurs, des états de carène), sur des efforts de mutualisation de la programmation (valorisations de transits, leviers pour le montage de campagnes pluridisciplinaires, campagnes mixtes enseignement/recherche/développement technologique), mais aussi sur d'autres aspects qui impacteront le travail scientifique lui-même (tels que de nouveaux types de propulsion, le partage de temps bateau avec des flottes étrangères géo-spécialisées...). La communauté scientifique OA jouera son rôle dans cette transformation en poursuivant ses réflexions prospectives qui prendront en compte la diversité

des situations : conditions de navigation/météo selon les chantiers ; tailles des équipages scientifiques donc des navires nécessaires à la réalisation des campagnes ; espace-temps des campagnes dans le temps ; possibilité de disposer de sources d'observations alternatives (mesures voiliers participatives, navires d'opportunité par ex.). Parmi l'éventail de solutions, la zone tropicale et ultra-marine se prête particulièrement bien à la mise en place d'observations sur un voilier qui pourrait être opéré par la FOF. Une telle initiative signalerait une réelle volonté de faire évoluer nos pratiques et permettrait de développer une expérience utile pour l'avenir. D'autre part, le développement d'instruments autonomes apparaît également comme un volant d'action complémentaire pour le maintien d'observations.

Par ailleurs, l'exploitation optimale des campagnes réalisées, par le soutien de leur valorisation au travers de diverses mesures d'accompagnement comme des ateliers post-campagne, le positionnement de ressources humaines ou des moyens dédiés aux réanalyses des données et échantillons des campagnes historiques doit rester une priorité, afin de faire fructifier au mieux le temps navire (voir également la section programmes nationaux). Un ou des groupes de travail seront formés pour approfondir ces réflexions et avancer de manière concrète. La CSOA approfondira ces réflexions pour les implémenter de manière concrète en portant une attention particulière à l'implication de l'IR FOF et au dialogue avec la CNFH et l'ANR.

Un effort de sobriété est nécessaire de la part des activités d'observation au sens large. Une réflexion sur la réduction de l'empreinte carbone des moyens d'observation, de logistique et de gestion de données paraît nécessaire pour proposer des manières d'allier nos ambitions et l'effort de sobriété au niveau des infrastructures de recherche. Certaines IR par exemple généralisent le diagnostic à distance de leurs équipements (ICOS) pour minimiser les transports liés à la maintenance.

Au-delà de l'empreinte carbone, l'utilisation de moyens non réutilisables (par exemple charges utiles sous ballon, lests ou flotteurs) devra être reconsidérée.

L'activité de modélisation pose des questions environnementales sensiblement différentes puisqu'une grande partie de son empreinte CO₂ est liée à la construction/renouvellement de l'infrastructure, plutôt qu'à son exploitation à base d'électricité faiblement émettrice de CO₂ en France. Les perspectives de production et consommation électrique à l'échelle européenne ne l'exonèrent néanmoins pas de l'enjeu de sobriété énergétique. L'amélioration prévisible du rendement des machines des calculs fait que l'effort à réaliser pour réduire de manière significative l'empreinte énergétique et environnementale des activités de modélisation est *a priori* compatible avec une augmentation relativement importante de la puissance de calcul disponible. Cela passe par une évolution des codes pour leur permettre

de tirer le meilleur parti des futures architectures accélérées (cf section Modélisation). Cela nécessite aussi de réinterroger le dimensionnement des programmes pluriannuels structurants, comme par exemple la fréquence et le périmètre des exercices CMIP. Des évolutions parallèles concernant le fonctionnement des centres HPC seront également nécessaires. Un travail sur la mutualisation et accessibilité des simulations dans la communauté et au-delà pourra atténuer l'effet de ces limitations. Le développement des analyses en cycle de vie sera indispensable pour guider les choix importants, e.g. faire durer un supercalculateur pour limiter l'empreinte liée à l'achat de nouveaux équipements vs. privilégier son renouvellement pour bénéficier d'une nouvelle génération de machines plus performantes.

Les déplacements aériens représentent une part non négligeable des émissions CO₂ de la communauté. Ces émissions sont principalement le fait de vols moyens/long-courrier non substituables par des modes de transport faiblement carbonés et intimement liés à nos activités scientifiques (observations sur des terrains éloignés) ou de formation au Sud. Mais des réductions significatives sont également possibles sur un ensemble d'autres déplacements (participation aux conférences, meetings, workshops). Cette décarbonation des déplacements passe par un ensemble de changements impliquant une réduction d'usages et progrès techno-scientifiques. Les discussions menées récemment par la communauté sur ce sujet suggèrent un niveau de maturité qui permettrait de démarrer un travail concret sur des trajectoires de décarbonation du poste « missions ». Une attention particulière sera portée à certains usages incompressibles, et notamment à l'importance pour de nombreux jeunes scientifiques de s'insérer dans un réseau international.

De nombreux signes indiquent que la déclinaison concrète d'une responsabilité environnementale dans notre domaine est en cours. Ce travail s'inscrit dans la durée et ce d'autant plus que notre communauté est grande utilisatrice de moyens lourds (flottes océanographiques, aéroportée, moyens satellitaires, calculs, bases de données...). Cet effort est à mener collectivement avec une attention aux rythmes et équilibres qui permettront à nos disciplines de continuer d'apporter les connaissances indispensables à la société, sans toutefois sous-estimer l'ampleur des enjeux liés à l'attractivité pour susciter l'intérêt des jeunes générations pour les métiers scientifiques dans le domaine (attractivité), liés à la résilience de notre système de recherche, et enfin liés à la capacité d'entraînement du monde de la recherche par son rôle modèle.

Éthique et engagement

Le défi climatique étant aujourd'hui au cœur de nombreux enjeux de société, les sciences du climat sont fortement exposées dans l'espace public. Les demandes d'expertise, de communication, d'engagement public des scientifiques du climat bousculent notre communauté, qui se trouve confrontée aux multiples facettes et dimensions des relations entre sciences et société. Des divergences notables s'expriment quant aux directions concrètes à suivre. Dans ce contexte, la CSOA a intégré à ses travaux prospectifs une réflexion sur l'éthique et la responsabilité de l'engagement public des scientifiques du climat et de l'environnement. Elle se base sur les travaux et recommandations du COMETS, mais aussi du rapport « Éthique et responsabilité de l'engagement public des scientifiques du climat et de l'environnement » produit par un groupe de travail de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). La communauté océan-atmosphère ouvre ainsi en son sein un large débat sur ces questions. La présente prospective se penche également sur l'éthique liée aux relations public/privé, à la participation ou la sollicitation du citoyen-chercheur (associations, collectivités territoriales, médias), et aux risques d'instrumentalisation (*greenwashing*, *participant washing*...).

Outre les questions de propriétés intellectuelles et de responsabilités pour le traitement desquels les services « valorisation » des organismes sont bien équipés, le partenariat public-privé peut parfois soulever des questions d'éthique de la représentation en faisant du chercheur voire de son équipement des éléments de la communication du financeur (apposition de logo, port de tenue siglée, interview de type publi-information...). Par ailleurs, la contrainte sur la publication de résultats dérangeants n'est malheureusement pas toujours absente de la relation entre équipe de recherche et financeur privé.

Depuis l'émergence des géosciences - et en particulier le domaine de l'océanographie - l'utilisation de vecteurs d'opportunité a été intégrée aux stratégies de la recherche. La communauté océan-atmosphère exploite actuellement plusieurs offres de ce type : embarquement de capteurs sur les avions de ligne commerciaux (IR IAGOS), embarquement de sondes de mesure chimiques et physiques de l'océan sur les bateaux de lignes (« ferry box ») ou accueil sur diverses plateformes privées pour poser des appareils de mesure temporaires. Néanmoins, un nouveau type d'offres a récemment émergé et revêt un caractère particulier : il s'agit d'offres commerciales – généralement à caractère touristique – qui valorisent la présence des scientifiques dans leur communication et en font un argument de vente. Il s'agit parfois de croisières de luxe dont l'activité connaît une telle croissance qu'il existe même un salon professionnel dédié à leur promotion. Dans la plupart des cas, l'opportunité

ne naît pas d'une demande initiale des scientifiques, mais répond à un positionnement marketing et fait parfois l'objet d'un lobbying auprès des organismes ou de leur tutelle pour obtenir leur caution quand ce n'est pas pour des subventions d'état.

Ces 'opportunités' n'offrent généralement aucun service qui ne puisse être assuré actuellement par les moyens nationaux (FOF...) et ceux ouverts par des accords internationaux (e.g. EuroFleet, Amundsen). Elles ne comblent pas un besoin scientifique avéré, et si elles peuvent éventuellement faciliter l'accès à certaines zones, c'est pour des expériences assez rudimentaires, limitées dans leurs couvertures spatiales et temporelles, qui ne répondent pas vraiment aux enjeux scientifiques des défis de nos prospectives. Cette inadéquation est particulièrement marquée pour l'offre technique proposée en océanographie qui est généralement très limitée et ne permet nullement – au contraire des moyens embarqués de la FOF – de mener les campagnes poly-instrumentées, pluridisciplinaires et de déployer les moyens lourds que nécessitent nos prospectives scientifiques.

En revanche, ces opportunités sont « offertes » à destination de zones éloignées fragiles (arctique, antarctique, déserts...) où même les scientifiques vont avec d'extrêmes précautions, faisant de la présence des scientifiques un encouragement au développement d'activités touristiques qui contribuent à l'anthropisation de ces milieux.

Il y a un enjeu éthique à permettre d'associer l'activité de recherche scientifique à des activités commerciales aux impacts potentiellement néfastes et à laisser les marques de rigueur et de responsabilité que sont les logos de nos organismes être ainsi dévoyées.

La prospective océan-atmosphère a d'ailleurs longuement débattu de ce type d'opportunités et si leur rejet n'est pas unanime, il est très largement partagé. Les initiatives pour y participer génèrent aujourd'hui des difficultés au sein de la communauté qu'on ne peut ignorer, difficultés que cette prospective propose d'aborder par une série de recommandations détaillées plus bas.

Les recherches en océan-atmosphère sont hautement pertinentes pour contribuer à la réponse à un ensemble de questions sociétales prégnantes. Elles suscitent donc l'intérêt des médias, ce qui est normal et même souhaitable. Si l'activité de divulgation est devenue indispensable pour un service public dont la première mission reste de produire des connaissances nouvelles mais dont la deuxième mission est d'en favoriser la dissémination, elle nécessite d'être d'autant plus encadrée par nos principes éthiques. Les ré-

centes crises (environnementales, sanitaires...) ont montré combien notre parole était importante pour assurer la place de la science et de la rationalité dans le débat public mais aussi combien elle pouvait être fragile tant les temps de la communication grand public ou les techniques des médias pouvaient parfois nous emmener en dehors de nos champs d'expertise. La communauté océan-atmosphère dans ce domaine se place clairement dans le cadre des recommandations du comité d'éthique du CNRS (AVIS n°2018-37 et AVIS n°2021-42) qu'elle entend promouvoir.

Nous proposons une démarche coordonnée par l'INSU en quatre temps :

- 1 Dans une première étape, la création d'un groupe de travail au sein de la CSOA jouerait un rôle moteur pour déployer une série d'actions pour approfondir, partager et cadrer la réflexion sur l'éthique et la responsabilité de l'engagement public des scientifiques, avec le souci des enjeux pratiques.
- 2 Une consultation sous forme de questionnaire aux personnels des unités permettrait une évaluation quantitative des positionnements rencontrés au sein de notre communauté sur la question de l'engagement public des scientifiques, et pourrait mesurer l'intérêt suscité par les actions proposées pour poursuivre ce travail.
- 3 L'engagement des personnels pourrait être recherché par l'organisation d'ateliers de restitution sur site vers les personnels des unités. Les Observatoires des Sciences de l'Univers ou les Fédérations de Recherches (les stations marines par exemple) semblent être les lieux présentant la diversité thématique nécessaire et la variété d'expériences permettant les échanges les plus riches. L'enjeu serait d'échanger sur le contenu des rapports d'étape et sur le travail réalisé, mais aussi de préciser ou de faire émerger des pistes d'actions, et d'identifier de potentiels contributeurs.
- 4 Ces ateliers pourraient déboucher sur la création de groupes locaux destinés à enrichir et nourrir la réflexion sur l'engagement public des scientifiques afin d'affiner la compréhension de certaines notions (au travers par exemple de lectures communes) mais aussi de partager des témoignages émanant des personnels. L'enjeu serait ici d'approfondir la réflexion théorique et d'analyser des cas pratiques.

D'autre part, il semble important à la communauté de diffuser et transmettre les enjeux autour de l'éthique via la formation initiale (au sein d'unités d'enseignements et auprès des écoles doctorales, école de journalisme) et continue (entreprises, think tank, associations, militants). Ce besoin de formation porte enfin sur du *media trainings* pour que chaque scientifique ait les éléments pour maîtriser sa communication, qu'il puisse suivre des formations dédiées aux échanges avec les politiques, les collectivités. Tous ces outils doivent nous aider et fixer un cadre pour distinguer notre engagement public et privé, à utiliser les canaux de communication disponibles pour faire de la médiation en

restant exclusivement dans nos domaines de compétence. Reprenant à son compte les conclusions de l'avis 2018-37 du comité d'éthique du CNRS qui recommande « de valoriser davantage la diffusion de la recherche et la vulgarisation bien conduite, dans l'évaluation de l'activité scientifique des chercheurs », et « de mieux reconnaître, dans le suivi de carrière des chercheurs, leur activité de vérification des résultats dans l'évaluation scientifique des collègues, afin de repérer les erreurs et de dénoncer les fraudes, qui décrédibilisent la recherche, susceptibles qu'elles sont de récupérations par les fabricants d'ignorance », la communauté souhaite que soit mieux reconnu et apprécié par les tutelles et par le comité national le temps passé par les chercheurs aux actions de communication et de formation (cf sciences et société)

Afin de garantir l'indépendance et la neutralité des chercheurs vis-à-vis de financements privés, l'utilisation large de la fondation CNRS comme intermédiaire pourrait être une piste à développer. La mise en place de ce dispositif pourra donc faire l'objet d'un échange auprès de la CSOA dans un premier temps, et plus tard auprès de la communauté via des webinaires par exemple, autour d'exemples concrets de montages de projets mixtes.

Développer une instrumentation innovante

Les progrès dans la compréhension des processus physiques et chimiques qui opèrent dans l'océan, dans l'atmosphère et à leur interface reposent fondamentalement sur notre capacité à les observer et à les quantifier, et ceci implique un développement continu de l'instrumentation qui permet ces observations. Ces développements concernent autant les mesures *in situ* que la télédétection active / passive. Ainsi de nouveaux prototypes sont en constante évolution pour mieux caractériser, échantillonner et analyser les environnements océaniques et atmosphériques.

ÉTAT DES LIEUX

Les avancées sur les défis scientifiques identifiés, et sur les aires prioritaires, passent par des développements s'affranchissant des limites actuelles, qu'elles soient opérationnelles, analytiques, ou liées au post-traitement.

Pour les méthodes de télédétection, et pour les mesures embarquées, la miniaturisation est également une nécessité pour augmenter la capacité de déploiement de ces instruments et ainsi le nombre de mesures. Ceci permettra de réaliser des profils atmosphériques de nanoparticules,

bioaérosols, propriétés physiques des nuages et d'autres paramètres atmosphériques (à adapter sur drones-ballons), quand aujourd'hui seules des mesures au sol ou sur avion sont disponibles. La miniaturisation des instruments facilitera aussi la portabilité entre les différents vecteurs (avion, ballon, site) et permettra le déploiement des instruments lors d'événements extrêmes.

Pour les mesures dans des environnements extrêmes, il est nécessaire d'augmenter les performances et la robustesse des instruments et des capteurs pour les déployer dans des conditions environnementales difficiles (froid dans les régions polaires; haute pression pour les grands fonds; humidité très élevée pour certaines expériences de laboratoire; embruns en mer) tout en conservant la précision obtenue en laboratoire. Il est nécessaire d'obtenir des performances énergétiques compatibles avec les contraintes qu'imposent les régions isolées, et de faciliter la transmission des données à distance.

Outre la consommation, une limite majeure des mesures est l'automatisation des instruments (par exemple télédétection, lidars, cytomètres...) mais aussi le traitement au-

DIRECTION INSTRUMENTATION INNOVANTE POUR LA RECHERCHE ET L'OBSERVATION (DIIRO)

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

Le développement instrumental a ainsi été identifié comme l'un des grands enjeux de la première prospective transverse 2020 du CNRS-INSU (commune aux domaines Terre Solide, Surfaces et Interfaces Continentales, océan-atmosphère et Astronomie-Astrophysique), qui a abouti à la définition des défis scientifiques interdisciplinaires que l'INSU développera collectivement. Suite à cet exercice de prospective, une nouvelle Direction Adjointe Scientifique a été créée, la DIIRO (Direction Instrumentation Innovante pour la Recherche et l'Observation). Celle-ci assure la coordination et le suivi de toutes les actions concernant le développement d'instru-

ments tant innovants que transversaux au sein de l'INSU. Elle accompagne et apporte un soutien aux projets structurants pour l'INSU, tels que les EQUIPEX (OBS4CLIM, ANVOLE, DeepSea'Nnovation, F-CELT) financés par le PIA-3 ou les PEPR financés par le PIA-4 (OneWater, FairCarbon, ORIGINS, Soussol, IRIMA). La DIIRO s'appuie pour cela à la fois sur la DT-INSU et sur une nouvelle Commission Spécialisée Instrumentation Innovante Transverse (la CSIIT). Ces nouvelles actions sont effectuées en collaboration avec les DAS et les CS de domaines OA, AA, SIC et TS. L'une des activités de la DIIRO et de la CSIIT est d'identifier les actions de Recherche et Développement au sein des différents laboratoires et des OSU. La DIIRO et la CSIIT accompagnent également le développement et la montée en maturité, le transfert et la valorisation des développements instrumentaux entre les domaines de l'INSU, avec les organismes de recherches partenaires ainsi que les autres instituts du CNRS, notamment au travers d'un appel à projets dédié doté pour permettre des avancées significatives (montée en TRL) sur 2 ans. Treize projets ont été ainsi financés au cours des 2 dernières années pour des montants entre 20 et 100 k€. La CSIIT se coordonne également avec les autres CS et les programmes nationaux pour repérer et soutenir l'émergence instrumentale à fort caractère transversal.

tomatisé des jeux de données, indispensable à la gestion du flux de données. Le traitement informatique des données collectées reste lourd et nécessite le développement de bases de données intégrant différents types de données hétérogènes (par exemple: les métadonnées océanographiques, les images, la taxonomie, les omiques, la complexité des particules marines et la dynamique des cellules qui évoluent dans le temps. etc.).

Pour l'observation spatiale, les priorités pour la communauté OA sont la continuité des mesures afin de maintenir les séries climatiques à long terme des variables essentielles, l'amélioration des résolutions spatiales et temporelles et de la précision des mesures, et la mesure de nouveaux paramètres (e.g. courants totaux de surface, épaisseur de glace de mer, salinité de surface et couleur de l'eau à haute résolution, caractérisation des aérosols présents dans les gouttelettes nuageuses...). Le développement de nouvelles techniques de calibration-validation sont nécessaires avec l'augmentation de la résolution, en lien avec le développement instrumental aéroporté. Le grand volume de nouvelles données spatiales multi-capteurs à traiter nécessite par ailleurs 1) des nouvelles techniques de classification et de traitement (Big Data/IA), en lien avec nos collègues de mathématiques et statistiques, et 2) les moyens de stockage et de calcul massifs, portés d'abord en tant que « produits démonstrateurs » par les laboratoires puis via les pôles de données.

L'intérêt constant pour les observations sur le long terme dans des régions éloignées (déserts humains, hautes altitudes, océan profond...) a encouragé plusieurs équipes à développer et à tester de nouveaux dispositifs fonctionnant en autonomie sur une grande variété de vecteurs. Un nombre croissant de projets propose de nouveaux développements, dont certains à faible coût, de faible consommation et ayant une empreinte environnementale réduite, tant pour la mise en place de réseaux d'instruments multi-messager pour l'observation en milieu urbain, pour la science participative par exemple, que pour l'océan, depuis des ballons stratosphériques ou des régions reculées du monde comme dans les régions polaires ou les fonds océaniques, où l'accès est difficile.

Les développements dans les domaines OA concernent aussi les engins autonomes (gliders mais aussi drones marins) et la multiplication des systèmes de mesures continues et autonomes, comme, par exemple, les bouées BGC-Argo dont les projets actuels et futurs les destinent à accéder aux grands fonds marins. Ces vecteurs marins embarquent des capteurs de plus en plus complexes (imagerie, acoustique, radiométrie hyperspectrale...). Ceci concerne aussi bien les mesures embarquées (avion, ballon, vecteurs marins) que celles des réseaux de mesures sol qui permettent de mieux documenter des événements météorologiques extrêmes (par exemple les tempêtes, le feu de forêt, ou de suivi des panaches volcaniques). La généralisation des capteurs mi-

niatures et basse consommation (turbulence, acoustique active et passive, imagerie, capteurs optiques d'oxygène dissous et nutriments...) pouvant être installées sur des plateformes autonomes ont permis de faire des avancées majeures dans la compréhension des processus océaniques.

L'augmentation de la résolution spatio-temporelle des images ou données (satellitaires, aéroportées, *in situ*), en conjonction avec l'application de l'IA (par exemple pour la reconnaissance automatique d'images), permet aujourd'hui le traitement automatique de quantités massives de fichiers complexes (monocellulaire, imagerie, radar). Ces développements sont appliqués tant aux sciences de l'atmosphère (que ce soit pour l'identification de cristaux de glace, des gouttelettes nuageuses, d'aérosols biologiques) que de l'océan (identification du plancton, des fronts dynamiques ou biologiques, la séparation des ondes et de la turbulence...). L'imagerie a fait d'énormes progrès que ce soit en cytométrie ou pour d'autres systèmes tels que l'UVP, le zooscan, les flowCams et les automates d'imagerie en microscopie automatisée. Ces méthodes sont également avancées pour les mesures des aérosols biologiques suspendus dans l'atmosphère, où des particules individuelles peuvent être caractérisées par leur forme, leur taille, et leurs propriétés de fluorescence.

Les nouvelles performances des instruments optiques (tels que la spectroscopie fluorescence, spectroscopie infrarouge ou spectroscopie d'absorption atomique) peuvent concurrencer, voire dépasser, celles de la spectrométrie de masse, une technique beaucoup plus lourde et plus consommatrice d'énergie. La combinaison de techniques est également une voie d'avenir (MC-ICPMS avec cellule de collision et couplages associés, par exemple).

Les IR sont un outil essentiel à la communauté. L'instrumentation qui y est déployée répond aux critères spécifiques de l'observation: robustesse, stabilité, automatisation de la mesure jusqu'à la distribution des données,... Il s'agit en effet d'acquérir des données traçables sur de longues durées (au-delà de la décennie) mais aussi d'en assurer la spatialisation à grande échelle, c'est-à-dire d'assurer la comparabilité entre des sites parfois très éloignés, opérés par des personnels différents et dans des conditions également différentes. La mise en place de centres de calibration pour assurer l'interopérabilité, l'intercomparabilité des instruments au sein de chacune des infrastructures est donc essentielle au succès de leur mission. Ces centres d'étalonnage offrent un service unique à la communauté OA en devenant des centres d'expertises dont les compétences s'étendent au-delà de la certification des observations. Ils ont vocation à être plus et mieux utilisés pour tester les nouveaux développements par rapport aux méthodes déjà bien établies.

Du point de vue des variables observées – et en particulier

dans le domaine de la composition chimique et biologique des milieux – , des efforts de développement sont encore nécessaires pour passer d'instruments de recherche opérés actuellement comme instruments d'observation de long terme à de véritables instruments d'observation à la fois stables, robustes et automatisés.

Il est légitime que les infrastructures nationales cherchent à s'appuyer sur des vecteurs d'opportunités tels que les navires marchands, lignes d'avions commerciales (IAGOS), ou rames de train – le projet RAIL équipe plusieurs trains du réseau SNCF de mesures embarquées (Equipex OBS4CLIM), pour augmenter la fréquence et la couverture spatiale des mesures. Ces développements sont bienvenus quand ils allient véritable plus-value scientifique et préservation de l'éthique (voir p. 105; Éthique et engagement).

Il est également nécessaire de mutualiser et maximiser l'utilisation des moyens nationaux à la mer, comme pour les mesures mises déjà en place dans les projets MAP-IO, COOL, SSS, SURVOSTRAL qui bénéficient des rotations régulières des TAAF pour compléter les mesures atmosphériques/océanographiques régulières dans l'hémisphère sud. En l'absence de labellisation de certains de ces services, garantissant une analyse coût-bénéfice scientifique expertisée, il faut toutefois veiller à ce que l'opportunité ne devienne pas le motif principal de ces campagnes.

La mutualisation de moyens lourds aujourd'hui sous-utilisés mais qui pourraient intéresser une vaste communauté, comme les drones à grande élévation, doit être considérée via l'IR IN-AIR, leur mise en œuvre ne pouvant se faire à l'échelle d'un laboratoire. Pour les IR proposant de tels moyens, il faut soutenir la mutualisation d'outils à l'échelle nationale ou européenne. Il pourrait être intéressant de rassembler et de diffuser l'information sur ce qui est disponible. Des catalogues de services pourraient être mis en place au niveau des IR et des OSUs qui hébergent ces plateformes, tels que ceux des parcs instrumentaux océanographiques locaux. La mise en place de plateformes qui établissent une procédure d'accès, à l'image de ce qui est déjà en place pour les sites instrumentés, et les services d'observation nationaux, ainsi que les plateformes instrumentées (comme CESAM, PEGASUS), et les plateformes de spectrométrie de masse (comme PANOPLY, PANISS & PAN-DA) est recommandée. Cette mutualisation des outils entre différents laboratoires doit être encouragée par des projets collaboratifs (financés localement ou nationalement), permettant de couvrir les coûts opérationnels et de RH. Il est en particulier essentiel que la maintenance et la jouvence de ces outils puissent être financés par les projets aussi facilement que l'achat de nouveau matériel.

La recherche basée sur les plateformes autonomes est fortement intégrée dans le paysage des IR nationales (comme ILICO) et internationales (comme ACTRIS, EuroArgo ou EMSO) existants ou à venir (OHIS, Fr-OOS). L'accès et l'uti-

lisation de ces plateformes doivent continuer à se faire via des outils communs et des infrastructures organisées qui rendent leur utilisation visible et conforme aux standards des programmes d'observation globaux (notamment en termes de diffusion, d'ouverture des données).

L'acquisition, le traitement et l'exploitation des données d'observation de l'environnement sont notamment au cœur des enjeux d'accélération de la transition écologique. Or, depuis une dizaine d'années, on observe un double développement : d'une part, celui d'une nouvelle gamme d'instruments, de petite taille, nomades et relativement bon marché, regroupés sous l'appellation générique de « micro-capteurs » et, d'autre part, celui des projets de sciences participatives permettant d'associer des citoyens non experts à la production de connaissance scientifique.

Les données obtenues dans des campagnes de sciences participatives, bien qu'elles soient souvent caractérisées par une précision et une qualité inférieures aux données couramment réalisées au sein des observatoires, sont complémentaires et représentent une alternative intéressante pour la densification de certains réseaux de mesures. L'effort de développement de capteurs compacts, peu onéreux, et facile à mettre en œuvre, ne peut pas faire l'économie d'une réflexion poussée sur des questions diverses (calibration, gestion du parc de capteurs, jouvence, quels retours aux participants, éthique, ...) et la communauté de chercheurs doit accompagner ces nouveaux modes de production de données pour assurer une exploitation adaptée de celles-ci. Enfin, il existe actuellement peu d'échanges, de partage, de diffusion, sur les développements en cours et sur les projets de sciences participatives. Ce besoin de partage et d'échange doit être une priorité dans les années à venir.

Les aires prioritaires sur l'Urbain et les Tropiques bénéficieront sûrement de la densification des réseaux de mesures urbains. La participation citoyenne peut s'avérer une opportunité si elle est bien exploitée et assimilée, tout en gardant à l'esprit que cette densification doit prendre en compte la durabilité des capteurs et la limitation de l'empreinte environnementale.

INSTRUMENTATION POUR LES SCIENCES DE L'ATMOSPHÈRE

Dans le domaine atmosphérique, le cycle de l'eau, ses changements de phase, les échanges d'énergie qui y sont associés, constituent des processus clés de plusieurs priorités de cette prospective. L'augmentation des capacités de télédétection de la vapeur d'eau atmosphérique et de ses isotopologues est cruciale en raison de son rôle clé dans le système météorologique et climatique. L'amélioration des sources laser et des détecteurs rendent aujourd'hui atteignables des performances qu'on ne pouvait espérer il y a encore peu de temps. Elles doivent constituer des objectifs pour notre prospective instrumentale.

La possibilité d'utiliser plusieurs longueurs d'onde en élargira les applications, par exemple aux méthodes qui peuvent être utilisées pour distinguer ses différentes phases dans les nuages (gouttelettes ou cristaux de glace).

La télédétection multi-longueur d'onde peut aussi être utilisée pour distinguer différentes typologies d'aérosol et leurs propriétés voire conduire à une classification en termes de composition chimique.

Les synergies entre méthodes de télédétection passive et active, mesures intégrées et sur la colonne ont conduit à des avancées instrumentales et algorithmiques par le passé. Elles devront être poursuivies en gagnant en robustesse et en universalité pour un déploiement plus large.

La synergie instrumentale au sens large couplant télédétection et mesure *in situ* devra être recherchée pour mettre en œuvre des caractérisations plus fines des masses d'air explorées ou/et pour permettre la validation des mesures de télédétection.

Nos perspectives scientifiques quant aux couplages des compartiment continentaux (voir p. 79) et atmosphériques nécessitent de développer les techniques indispensables à une meilleure caractérisation des flux d'énergie. Il s'agit par exemple :

- de la mesure des flux de surface par vents forts qui reste très compliquée ;
- de la documentation de l'évaporation sur les différentes surfaces et notamment les surfaces en eau qui doit être poursuivie ;
- de la quantification des incertitudes associées aux observations de flux de surface et des coefficients d'échange qui doit être améliorée.

Le maintien et le développement de nos capacités d'étude de la stratosphère nécessiteront de développer encore la miniaturisation de l'instrumentation pour utilisation sous ballons et de développer des concepts de vecteurs combinant ballons et drones pour la récupération d'équipement légers mais réutilisables. Au-delà de cela, maintenir et développer notre capacité à observer la haute atmosphère



nécessitent absolument la mise en service d'un nouveau jet de SAFIRE en remplacement du Falcon 20 mais aussi le développement de ballons stratosphériques manoeuvrables au sein de l'infrastructure IN-AIR.

D'une façon générale, la communauté de chimie atmosphérique est en capacité de développer l'instrumentation scientifique permettant d'accéder finement aux paramètres des processus dynamiques ou chimiques dont les profils verticaux manquent cruellement. Des efforts doivent donc être portés pour en développer des versions déployées sur les plateformes mobiles verticales (avions légers eg. Piper Aztec, drones, ballons, et ballons captifs...). Elles ouvrent en effet des opportunités d'accès à de nouvelles échelles spatiales et temporelles qui seront précieuses pour l'exploration verticale de l'aire prioritaire Urbaine (cf. p.84-87).

Vue de l'intérieur de l'ATR 42 de SAFIRE instrumenté pour l'échantillonnage du panache de pollution de l'Île de France pendant la campagne ACROSS/PANAME en juillet 2021

© Thibault Vergoz / CNRS Images



Dans le domaine de la caractérisation de la composition chimique des phases gazeuse et particulaire atmosphérique, il s'agira de poursuivre le développement des spectromètres de masse, notamment ceux à ionisation chimique multi-réactifs et multi-polarité. Au cours des cinq dernières années, les techniques de spectrométrie de masse disponibles sur le marché ont, en effet, connu un essor considérable. Ces techniques ont permis d'identifier un large éventail d'espèces atmosphériques jusqu'à des tailles nanométriques mais aussi des espèces de volatilité intermédiaire, dont la caractérisation était impossible auparavant. Les modes d'ionisation permettent aujourd'hui d'atteindre des concentrations de l'ordre du pptv ou moins en phase gazeuse et on entrevoit la possibilité de mesurer des radicaux. Force est de constater que la communauté française de chimie atmosphérique est encore relativement peu dotée des instruments les plus puissants du marché. Il conviendrait de voir comment sa structuration ou/et l'émergence à des financements d'envergure pourrait permettre d'accéder à ces technologies.

Par ailleurs, les techniques de spectrométrie de masse moderne ouvrent des champs nouveaux et l'un des défis est de les rendre pleinement transportables sur le terrain et de les avioniser.

La création de lieu d'échange entre les équipes françaises développant des instrumentations sur les mêmes cibles ou molécules face à l'international (ex. radical OH, ammoniac, etc.) apparaît aussi souhaitable pour limiter les redondances, échanger les concepts et mutualiser les moyens de génération des espèces cibles et de calibrations ou d'intercomparaison. Les infrastructures de recherche peuvent constituer un écosystème de choix pour ce genre d'activités en communiquant leurs attentes prioritaires, en mobilisant leur expertise, leur moyens de calibrations, les chambres de simulations atmosphériques ou les sites de mesures pour les exercices d'intercomparaison. Un fort suivi – voire une animation – par la DIIRO viendrait en assurer la cohérence au-delà de la limite des IR.

INSTRUMENTATION POUR LES SCIENCES DE L'OcéAN

Dans le domaine océanique, pour répondre aux défis sur les modes de variabilité climatique (Défi «variabilité, tendances et points de bascule») et sur les événements extrêmes (Défi «événements extrêmes»), et le lien biogéochimie-vivant (Défi «Diversité du vivant et biogéochimie»), plusieurs axes de développement instrumental devront être renforcés.

Le premier axe concerne l'augmentation de notre capacité à échantillonner l'environnement océanique, comme par exemple le développement d'échantillonneurs *in natura* pour concentrer par exemple les micro-organismes ou les polluants, et de poursuivre le développement de préleveurs



automatiques. La poursuite des développements d'automates de tri, en cytométrie, microscopie, avec notamment les développements en microfluidique et robotique, doit continuer à faire partie des instruments innovants préalables aux analyses en imagerie, omics, et biogéochimiques.

Un deuxième axe porte sur l'extension de la capacité d'exploration des vecteurs, permettant l'exploration de l'océan profond, ou des marges englacées ou libres, voire sous les calottes de glace. Il est ainsi impératif de continuer à développer les vecteurs marins tels que les Argo et les gliders avec des capacités de déploiement à grandes profondeurs, pour documenter notamment les flux de carbone profonds, et suivre l'évolution thermique de l'océan profond. Les vecteurs de subsurface sont également à renforcer pour accéder à la zone de transition rivière/océan, toujours difficile d'accès. Les hautes latitudes font partie des aires dans lesquelles une instrumentation dédiée doit être développée pour notamment observer les masses d'eau des cavités sous glaciaires du plateau antarctique ou de l'interface glace-océan, ainsi qu'étendre les réseaux de flotteurs Argo aux océans polaires.

Un troisième axe devra poursuivre des développements par capteurs in situ, pouvant être déployés sur les nouveaux

vecteurs, et ce en particulier pour obtenir des données biologiques (imagerie, eDNA, biocapteur, proxy biologique...) et physiques (acoustique, microturbulence) en soutien aux observatoires sous marins (planeurs, animaux instrumentés...). L'imagerie optique a encore un grand potentiel de développement, les développements sur l'acquisition d'imagerie tridimensionnelle et sur l'intégration du machine learning permettant un saut d'échelle. Dans la gamme de taille du micron au centimètre, les cytomètres automatisés et submersibles capables d'analyser et d'imager la classe de taille des micro-organismes comprenant micro-organismes hétérotrophes (bactéries, protozoaires, zooplancton).

Enfin, à l'instar de la communauté d'atmosphériciens, les capacités nationales d'étalonnage des instruments doivent faire l'objet d'une réflexion, pour limiter les périodes d'immobilisation des sondes, envoyées à l'étranger pour être étalonnées, pour limiter les coûts associés d'expédition et de dédouanement, et également favoriser de bonnes pratiques. Cette réflexion pourra être menée dans un premier temps par le Fr-OOS, pour guider une mise en œuvre opérationnelle à plus longue échéance de temps.



Premier essai en mer du prototype du profileur VVP (Vertical Velocity Profiler) destiné à mesurer les courants marins verticaux. Il a été mis à l'eau dans la rade de Marseille, dans la mer Méditerranée, par l'Antédon II, un navire de la flotte océanographique française. Deux plongeurs accompagnent le prototype afin de documenter son comportement in situ. Le VVP a été imaginé et fabriqué par l'Institut méditerranéen d'océanologie (MIO).

© Dorian GUILLEMAIN / OSU Pythéas / CNRS Images

INSTRUMENTATION POUR LE SPATIAL

Dans le domaine du développement instrumental au service de l'observation de la Terre depuis l'espace, il existe en France un continuum unique qui va du développement des technologies de base jusqu'au transfert vers les industriels qui produisent les instruments embarqués. L'entière de la chaîne de maturité technologique (TRL - Technology Readiness Level ou niveau de maturité technologique) est ainsi couverte grâce à une synergie entre les laboratoires de recherche et leurs tutelles CNRS et les agences spatiales au premier rang desquelles le CNES. Les éléments de cette prospective ont donc vocation à alimenter le très prochain Séminaire de Prospective du CNES et contribuent à la cohérence entre les priorités scientifiques de la communauté et les logiques programmatiques et industrielles légitimes des agences.

Les recommandations dans le domaine de l'observation spatiale doivent permettre de répondre au triple enjeu constitué par la valorisation de l'existant, la continuité sur le long terme des observations et le développement de nouveaux systèmes d'observation spatiaux. Sur ces 3 volets, le rôle essentiel des réseaux d'observation au sol doit être rappelé et intégré dans la réflexion programmatique des missions spatiales. Enfin, ces enjeux scientifiques sont par

ailleurs à considérer dans un contexte industriel et économique où les acteurs émergents du « New Space » doivent trouver leur place.

Un premier axe visera à **consolider les acquis**. De très nombreuses missions sont actuellement en exploitation ou seront prochainement lancées (Sentinel/Copernicus, Meteosat Third Generation, METOP Second Generation) avec des instruments sur lesquels la communauté océan-atmosphère est très impliquée (SMOS, SWOT, IASI-NG, 3MI, EarthCare, MicroCarb, TRISHNA...). Il est indispensable de pouvoir maintenir l'effort d'analyse ou de préparation de ces missions afin de les valoriser au mieux, notamment en favorisant les développements méthodologiques (codes de simulation, méthodes d'analyse et d'assimilation) permettant l'exploitation en synergie des différents capteurs. À titre d'exemple, il est essentiel dans le domaine de la composition atmosphérique de préparer les synergies de traitement des données des capteurs IASI-NG et Sentinel 5 sur METOP-SG et IRS et Sentinel 4 sur MTG.

Le développement de missions permettant d'**assurer la continuité des séries d'observations** pour les Essential Climate Variables (ECVs) est une priorité. Ainsi, le maintien d'observations de salinité de surface à haute résolution après SMOS en complément du SNO SSS apparaît comme une priorité pour la communauté puisqu'au-delà de la perte des expertises acquises par les équipes scientifiques françaises mobilisées depuis plus de 20 ans dans ce domaine, les séries climatiques seront interrompues. Il est dans la même ligne essentiel de pouvoir assurer la continuité des mesures micro-ondes de la SST et de l'épaisseur de glace (CRISTAL et CIMR).

Un troisième axe visera **l'amélioration des capacités d'observation, et l'accession à de nouvelles variables**. Pour l'océan, il est nécessaire dans les prochaines années de se concentrer sur l'amélioration de la couverture à haute résolution dans l'espace (SMOS-HR), et le temps (concept de constellations ou de missions géostationnaires), des observations par satellite dans certaines régions (régions polaires, mers côtières, estuariennes et régionales, bande équatoriale) avec une meilleure précision. De nouvelles missions doivent également pouvoir être développées pour combler les lacunes dans l'observation de certains ECVs océaniques, avec notamment la mesure des courants agéostrophiques de surface grâce à l'embarquement de diffusiomètre Doppler (projet de mission OdySea NASA/CNES). De manière plus générale, il est nécessaire de chercher des solutions permettant la mise en oeuvre de mesures actives qui apportent des informations sans équivalent sur l'état de l'océan, sa dynamique (courants, vagues...) son état thermodynamique, sa biologie et chimie de surface et sur la caractérisation du domaine côtier. On note en particulier le besoin du développement de mesures à partir de lidar et de polarimètres optimisés pour l'observation océanique afin d'accéder notamment à la distribution verticale du phytoplancton.

Dans le domaine de l'atmosphère, il est nécessaire de disposer de nouvelles générations de systèmes de mesures (Lidar, micro-ondes, etc) afin d'assurer des données continues sur le long terme, avec une résolution plus fine des paramètres physiques ou dynamiques de l'atmosphère et à plus forte fréquence de rafraîchissement. Pour la vapeur d'eau par exemple, la télédétection active depuis l'espace offre de nombreux avantages importants par rapport aux techniques actuelles d'observation, comme une grande précision, un faible biais et des profils à haute résolution verticale s'étendant du sol à la haute troposphère et à la basse stratosphère. Bien entendu la synergie entre lidar vapeur d'eau DIAL ou IPDA avec les sondeurs micro-ondes doit être étudiée. L'implication de la France dans le développement de la mission AOS (Atmospheric Observing System) est une priorité forte pour la communauté avec notamment la contribution du tandem de radiomètres micro-onde C2OMODO. La mission AOS succèdera aux missions A-Train et GPM (Global Precipitation Mission) et représente le programme le plus ambitieux jamais développé à ce jour pour l'observation combinée passive et active de l'atmosphère. Enfin, la mission C3IEL vise à implémenter une stratégie d'observation innovante de la convection nuageuse à partir de mesures passives par le biais de la stéréoscopie instantanée et l'observation à haute résolution spatiale de la vapeur d'eau.

Dans les deux domaines O & A, il est important 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, les aérosols et la dynamique atmosphérique.

Liens du spatial avec les données et réseaux d'observation sol

Les données de télédétection depuis le sol et de mesures *in situ* fournies par des ensembles instrumentés (plateformes mobiles de terrain, chambres de simulation, sites instrumentés et réseaux d'observation, plateformes autonomes...) sont essentielles pour la validation et l'exploitation optimale des missions spatiales.

En pratique, un effort de développement méthodologique doit également être fait pour permettre les synergies entre observations spatiales et les réseaux sol et les capteurs *in situ*. De même la mise à disposition et l'accès à ces données d'observation « sol » via les IRs doivent être développés, facilités et encouragés en lien avec les pôles de données.

L'apparition récente d'options d'accès à distance via l'IR ACTRIS devrait encourager la collaboration entre les sites d'observation et les opérations satellitaires. Cette activité permettra d'optimiser les mesures de surface pour les comparer aux mesures satellitaires, ce qui conduira à un nombre croissant de techniques d'évaluation et de vali-

dation. Ces mesures sol, et/ou aéroportées permettent de valider les observations spatiales ainsi que les analyses météorologiques (de plus en plus complètes et sur un domaine d'altitude s'étendant jusqu'à la mésopause).

Les acteurs internationaux tels que l'Agence spatiale européenne (ESA), Copernicus, l'Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT) ou l'Agence européenne pour l'environnement (AEE), génèrent et utilisent de grandes quantités de données d'observation de la terre. S'il ne fait aucun doute que ces agences pourraient bénéficier d'un accès aux infrastructures de recherche atmosphériques et notamment ACTRIS, il n'existe à ce jour que peu de collaborations entre ces groupes et celles-ci doivent donc être encouragées. Par ailleurs, une réflexion doit être menée avec ces agences sur la mise en place d'un support programmatique pérenne pour l'observation *in situ* nécessaire aux activités Cal/Val des missions spatiales (non limité à une mission particulière mais plutôt lié à une « filière »).

Quelle place pour le « New Space » ?

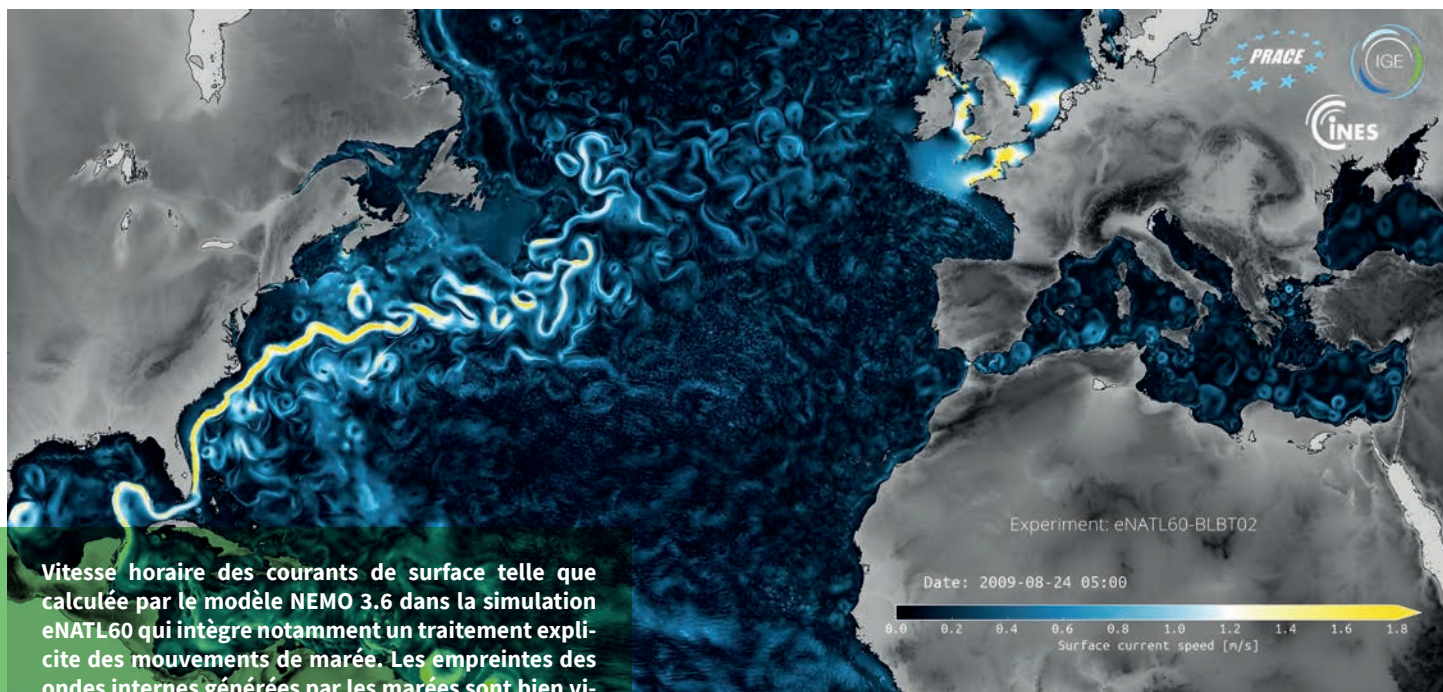
Indissociable du « New Space », le développement de constellations de petits satellites est une approche de rupture qui permet d'augmenter le nombre de mesures et qui associé avec l'IA (comme pour l'assimilation dans les modèles) laisse entrevoir l'utilisation de capteurs moins sophistiqués. Si les perspectives sont prometteuses, la question de la précision et la validation des observations fournies par les plans du « New Space » est critique et déterminante pour la place que pourront prendre ces observations dans le système global de l'observation spatiale.

Certains paramètres présentent une forte signature et peuvent effectivement profiter d'un réseau de micro-satellites plus dense. D'autres paramètres ont besoin d'une plus grande précision et continueront de nécessiter des missions scientifiques dédiées.

Dans cette double-voie future, les laboratoires du domaine OA devront se positionner pour préciser leur rôle dans le développement d'instrumentation pour le spatial : développement des parties instrumentales et la R&T en interne ? travail d'expertise avec les industriels ? réalisation de démonstrateurs R&D et puis un transfert vers les industriels ? Ce positionnement des laboratoires devra être précisé en prenant en compte leurs relations avec :

- le CNES/ESA/EUMETSAT pour la filière de grands satellites ;
- les centres spatiaux universitaires pour le développement de nanosat/microsat à plus forte valeur ajoutée scientifique pour l'observation de la Terre ;
- les centres de traitement de données pour passer de la physique de la mesure aux paramètres géophysiques précis et produits élaborés ;
- les pôles de données pour la distribution des produits.

Numérique et modélisation



Vitesse horaire des courants de surface telle que calculée par le modèle NEMO 3.6 dans la simulation eNATL60 qui intègre notamment un traitement explicite des mouvements de marée. Les empreintes des ondes internes générées par les marées sont bien visibles dans la partie la plus méridionale du domaine et autour des Açores. eNATL60 est une configuration à l'échelle du bassin du modèle de circulation générale des océans NEMO (<https://www.nemo-ocean.eu/>) à très haute résolution horizontale ($1/60^\circ$ soit Δx entre 0,8 et 1,6 km) et verticale (300 niveaux). eNATL60 est le successeur et la version spatialement étendue de NATL60, il inclut le mouvement des marées et couvre l'Atlantique Nord d'environ 6°N jusqu'au cercle polaire. Les simulations sont réalisées sur le supercalculateur MareNostrum du Barcelona Supercomputer Center grâce à une allocation de 40 millions de cpu-heures (18 000 processeurs en parallèle, pas de temps du modèle : 40s, 45 minutes d'intégration pour 1 jour de modèle) accordée par PRACE à Ocean Next

© MEOM / IGE / NEMO/PRACE

Ces outils de modélisation intègrent et connectent de façon les plus cohérentes possibles les connaissances de l'ensemble des composantes du système climatique et leurs interactions, et sont devenus des outils indispensables pour comprendre, mais aussi pour prévoir, et projeter, l'évolution du climat. Ces modèles sont des constructions délicates élaborées pour certaines depuis plusieurs décennies et faisant appel à des stratégies algorithmiques de plus en plus complexes. Leurs imperfections ont été réduites au fil du temps mais certaines persistent et ont des implications importantes par leurs effets en termes d'erreurs et d'incertitudes (e.g., difficultés à prévoir la stationnarité ou le déplacement de certains phénomènes fortement précipitants sur la côte méditerranéenne, amplitude de la montée du niveau marin le long des côtes françaises...).

Continuer de les faire progresser passe, dans une certaine mesure, par un accroissement de la puissance de calcul qui permet : la complexification des codes pour mieux représenter les processus clé ; la prise en compte d'un plus grand nombre de couplages entre composantes ; des simulations plus longues et/ou plus nombreuses (ex : stratégies de grands ensembles) ; la montée en résolution. Cela passe également par notre capacité collective à faire exister un écosystème de modélisation apte à poursuivre l'exploration de voies originales parfois très éloignées des sentiers battus, que ce soit en termes de fondements théoriques, méthodes numériques, langage de programmation...

La modélisation des différentes composantes du système Terre a connu ces dernières décennies des avancées majeures, intégrant petit à petit la représentation de processus de plus en plus détaillés, les couplages entre grandes composantes du système climatique (atmosphère, océan, surfaces continentales, calottes polaires, composition atmosphère), et tenant compte de mieux en mieux des grands cycles biogéochimiques qui régissent l'évolution du climat terrestre et ses interactions avec les milieux : bilans d'énergie, cycle de l'eau, du carbone, de l'azote etc. Ceci inclut de façon croissante la réponse dynamique des écosystèmes terrestres et marins, capitaux pour représenter toutes les facettes de la machine climatique terrestre.

Durant la période couverte par cette prospective, plusieurs grandes tendances se dessinent sur les développements et l'usage des modèles numériques du domaine OA :

- déploiement de supercalculateurs pétaflopiques basés sur des processeurs de type GPU (eg. programme exascale);
- avancées rapides des approches type IA (eg. apprentissage profond) en modélisation du système Terre notamment pour produire les paramétrisations pour lesquels l'approche cognitive est encore inaccessible;
- tendance à l'augmentation des résolutions spatiales (eg. Digital Twins);
- besoins grandissants en services climatiques/environnementaux et produits opérationnels;
- tendance à faire jouer un rôle de plus en plus diversifié aux modèles numériques, notamment comme intégrateurs de savoirs multidisciplinaires et assimilateur de données hétérogènes...;
- montée des contraintes écologiques sur l'activité de recherche elle-même, avec des implications concrètes en termes de consommation énergétique mais aussi matérielle;
- structuration des travaux OA par de grands programmes de recherche nationaux et européens ainsi que par les besoins des centres opérationnels.

Concernant cette dernière tendance, il semble important de souligner que les grandes orientations prospectives en modélisation OA pour les 5-10 ans à venir seront en grande partie mises en oeuvre au sein de quelques grands programmes et projets qui vont démarrer prochainement (PEPRs TRACCS, NumPEX, OneWater, et Grands Fonds; Jumeau Numérique de l'Océan/plan scientifique Mercator; DestinE...).

Dans ce contexte, la réflexion prospective OA a tenté de faire émerger un certain nombre de guides, points de vigilance, garde-fous, et d'identifier certaines zones aveugles potentielles où les ressources du programme LEFE – par exemple – pourraient apporter un soutien utile. L'intention est qu'ils contribuent à orienter les efforts par delà le foisonnement des initiatives déjà engagées. Au premier rang des points clé identifiés figure l'importance de maintenir une bonne distribution des rôles et les complémentarités entre acteurs académiques et opérationnels. Ouverte aux évolutions, et sans s'arc-bouter sur des distinctions souvent artificielles entre recherche fondamentale et recherche appliquée, notre communauté veillera à ce que ces évolutions soient : cohérentes avec l'ambition d'une science ouverte (e.g., mise à disposition des codes source et simulations); attentives aux besoins opérationnels mais aussi à la place de la sérendipité et de la curiosité dans les processus de production de savoir; guidées par une vision élaborée collectivement des enjeux scientifiques et sociétaux sous-jacents, notamment de long terme.

ENJEUX SCIENTIFIQUES

Les sources persistantes d'erreurs et d'incertitudes des modèles OA sont pour l'essentiel liées aux non-linéarités et

autres interactions d'échelles qui interviennent au sein ou par couplage des composantes du système Terre. Les efforts nationaux prévus pour y remédier concernent un large éventail de sujets concernant les six défis, et portent notamment sur la microphysique; la convection (atmosphère et océan); les interactions entre aérosols, nuages et précipitation; l'électrification des nuages; la chimie en phase aqueuse; rayonnement 3D; les flux air-mer et flux terre-mer; les interactions circulation océanique-topographie; la turbulence méso/sous-mésoéchelle; ou encore les interactions océan-atmosphère-cryosphère...

Parmi les sources d'erreurs modèle bien identifiées, la paramétrisation des processus de la couche limite océanique a des conséquences particulièrement critiques, par exemple pour anticiper l'évolution de la circulation méridienne de retournement donc l'enfouissement de carbone et chaleur d'origine anthropique dans les océans mais aussi les modifications du climat régional autour de l'Atlantique (Europe de l'Ouest et Sahel en particulier). La structuration des efforts visant à l'amélioration des paramétrisations physiques des modèles atmosphériques permise par le programme national DEPHY (« Développement et Évaluation PHYsiques des modèles de climat et prévision du temps ») pourrait servir de modèle à un analogue océanique visant à acquérir une dimension internationale. Poursuivre l'assemblage de jeux de données et en simplifier l'accès sera plus généralement à encourager, par exemple, pour l'évaluation des codes radiatifs, de micro-physique ou de simulations paléoclimatiques.

Les calottes polaires ont longtemps été considérées comme une composante particulièrement lente du système climatique, si bien qu'elles ne sont pas représentées dans les modèles du système Terre. L'accélération soudaine de nombreux glaciers émissaires du Groenland et de l'Antarctique observée au tournant du XX^e siècle, et leur contribution significative et croissante à l'élévation du niveau des mers invite à reconsidérer cette hypothèse. Une nouvelle génération de modèles de calottes polaires est depuis lors en développement, maintenant capable de représenter les changements dynamiques observés. Ils ont atteint une maturité suffisante pour être pleinement intégrés dans les modèles du Système Terre. C'est une priorité de la communauté nationale et des calottes polaires interactives seront ajoutées aux modèles IPSL-CM et CNRM-CM dans les prochaines années, en particulier dans le cadre du PEPR TRACCS.

La diversité et la complexité des questions posées aux modélisateurs du système Terre rend nécessaire l'utilisation combinée de hiérarchies de modèles. Pouvoir naviguer simplement et de manière cohérente au sein de ces hiérarchies est indispensable et impliquera la poursuite d'un travail d'interfaçage de longue haleine.

En parallèle de tous ces efforts, une meilleure quantification des incertitudes attachées aux simulations OA apparaît indispensable et sera l'objet d'attentions particulières.

La construction assistée par l'IA de vastes modélisations d'ensembles doit permettre des avancées majeures sur les incertitudes paramétriques. Des approches de type what-if scénarios permettront de prendre en compte des évolutions climatiques à fort impact.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les contributions potentielles des approches type intelligence artificielle/apprentissage profond à nos disciplines apparaissent désormais bien cernées. Elles concernent une grande diversité de problématiques en modélisation :

- émulation de toute ou parties de modèles pour différentes applications comme la calibration automatique ou l'accélération des phases d'ajustement/spin up, voire la production complète de prévisions numériques du temps ;
- développement de paramétrisations (e.g. par identification de corrélations entre variables dans des simulations haute résolution) ;
- génération des différents membres des runs d'ensembles ;
- ajustement de stencils de schémas numériques à la volée ; et toutes sortes de diagnostics pour l'analyse fine des simulations.

Les contributions de l'IA émergent également dans le domaine de l'observation, pour notamment la détection et reconnaissance d'objets comme les formations nuageuses, de plancton, de microfossiles, etc.

Un certain nombre d'efforts en cours sont à poursuivre et amplifier (ajustement automatique pour les modèles couplés) et la communauté apparaît bien organisée pour cela avec en particulier le programme national de recherche en intelligence artificielle coordonné par l'INS2I, le GdR « Vers de nouveaux outils théoriques pour le climat », les partenariats avec la Maison de la Simulation, contributions des équipes INRIA...

Des échanges préparatoires à la rédaction de la prospective ressort néanmoins l'attachement de la communauté à préserver la place des approches mécanistes (i.e., s'appuyant sur les principes fondamentaux) comme source de compréhension des phénomènes physiques, contrastant avec l'approche « en boîte noire » qui pourrait caractériser certains usages de l'IA.

ÉVOLUTION DES ARCHITECTURES, COMPLEXIFICATION DES CODES

La période qui s'ouvre est marquée par une probable **émergence massive du calcul haute performance**. Il y a notamment la volonté de la France de répondre au prochain appel à manifestation d'intérêt d'EuroHPC (Projet Exascale France), en vue d'héberger l'une des deux machines européennes exaflopiques prévues en Europe à l'échéance de 2024. Ce positionnement national s'accompagne du PEPR « Numérique pour l'Exascale » (NumPEX) qui a pour objectif de concevoir et

développer les briques logicielles qui équiperont les futures « machines exascales » et de préparer les grands domaines applicatifs visant à exploiter pleinement les capacités de ces machines.

Le domaine OA est évidemment concerné via la modélisation des différents compartiments du système Terre et le positionnement de ses codes communautaires et grands systèmes de codes.

Ces codes sont en évolution constante, notamment pour des raisons d'efficacité sur des machines elles aussi en rapide évolution. Certaines parties de ces codes peuvent exister en plusieurs versions adaptées à différents calculateurs (LMDZ par ex.).

La communauté de modélisation OA française a engagé le travail sur ses codes pour répondre à des évolutions d'architecture des supercalculateurs pourtant mal adaptées à ses besoins. Le rôle de l'IR CLIMERI sera important pour poursuivre cet effort de manière coordonnée. Il est aussi possible que certains usages de la communauté océan-atmosphère restent demandeurs de processeurs polyvalents de type CPU et il importe donc que le passage à l'exascale ne soit pas monolithique.

Néanmoins, la communauté modélisation OA française entend tirer parti du contexte « projet Exascale » pour passer de la phase de tests en configuration simplifiée (eg. mini-apps) aux utilisations en mode production.

On observe une grande diversité de situations selon les codes. Certaines parties de ces codes se portent relativement naturellement sur GPU, par exemple la partie dynamique de LMDZ réécrite récemment ou la partie dynamique pseudo-compressible du code d'océan CROCO. Pour de nombreuses autres, tirer parti de l'accélération GPU est loin d'aller de soi et de nombreuses incertitudes demeurent sur les bénéfices qui pourront être tirés de la machine exascale (dont les caractéristiques sont elles même encore largement inconnues).

La communauté OA a cependant conscience des gains d'efficacité que l'utilisation des GPUs permet en théorie. Le développement de ces codes requiert des compétences larges allant de la physique théorique à l'informatique la plus appliquée. Il doit se faire dans le respect des procédures communautaires même si, considérant l'enjeu, elles peuvent aussi évoluer pour lever d'éventuels freins. Plus généralement, ce développement doit préserver la possibilité pour les physiciens, chimistes, biogéochimistes ... de lire et intervenir facilement dans le code sans une connaissance trop pointue des questions d'optimisation.

Il est clair que tirer le meilleur parti des GPU va demander une restructuration des codes coûteuse en ressources humaines. La communauté OA n'a pas suffisamment de ressources hu-

maines disponibles pour engager des réécritures complètes des codes existant et, surtout, elle ne considère pas de telles réécritures comme suffisamment prometteuses pour arrêter des tâches prioritaires à leur profit. Il s'avère ainsi indispensable que des ressources supplémentaires soient identifiées soit à travers les appels d'offres de NumPEX, soit à travers le projet Exascale-France (dont il serait sage qu'il ne finance pas uniquement les machines) soit à travers des initiatives européennes.

Néanmoins, l'arrivée des machines exascale va fortement interférer avec le travail des équipes sur le 7^e exercice d'intercomparaison de modèles climatiques. Il est sûrement nécessaire de se poser la question de cette interférence y compris en considérant le calendrier et le périmètre de ces exercices CMIP.

Tirer parti des nouvelles architectures type GPU représente donc un défi en termes d'évolution des codes et des pratiques que la communauté OA se prépare à relever. Ce défi intervient dans un contexte de sollicitation extrême des équipes de développement qui sont souvent sous-dimensionnées et qui peinent à capitaliser leur savoir-faire du fait d'un fonctionnement sur projets courts et du recours aux CDD dans un secteur d'emploi en tension. Il est critique que les opportunités d'envergure qui se dessinent permettent une visibilité et une stabilité accrues pour ces ressources humaines.

Les efforts de mutualisation et de partage d'expérience seront à poursuivre notamment sur les blocs qui s'y prêtent bien (IOs, workflows, coupleurs). Les portages GPUs déjà réalisés devraient aider, par partage d'expérience, les groupes de modélisation qui n'ont pas démarré ce travail (avec un rôle décisif de CLIMERI). Mais le traitement de problématiques spécifiques aux différents codes est inévitable, une partie d'entre eux restant loin d'être optimisée aux architectures multi-cœurs actuelles. À moyen terme, l'arrivée des premières capacités de calcul quantique pourrait se faire durant la période concernée par cette prospective. Il y a, en arrière plan de tout cela, un enjeu considérable en termes de formation (initiale et continue; cf p.132-134).

RESPONSABILITÉS ÉTHIQUES

Dans un contexte sociétal marqué par le besoin pressant d'apporter des réponses à un faisceau de problèmes environnementaux, une responsabilité éthique de la communauté sera de formuler ses promesses et espoirs d'avancées avec prudence et conscience des rythmes inhérents aux progrès dans nos disciplines. Ceci concerne notamment les attentes liées à la montée en résolution des simulations.

L'augmentation de la résolution continuera de jouer un rôle important (ex: pour guider le développement de paramétrisations ou résoudre explicitement certains processus - lien avec le défi convection) mais n'est qu'une des voies parmi d'autres d'amélioration incrémentale des modèles. Pour de

nombreuses applications notamment les projections climatiques à divers horizons, le besoin de mieux quantifier les incertitudes, sensibilités, propagation d'erreurs... requiert la réalisation de grands jeux de simulations donc la poursuite d'un travail à des résolutions comparables à celles utilisées actuellement. L'ampleur de ces jeux est donc aussi à considérer au regard de leur coût énergétique. De même la fréquence et la structure des grands exercices d'intercomparaison ne peuvent rester hors du débat.

Finalement, la modélisation OA se trouve, comme les autres activités de la société, confrontée à des contraintes climatiques et énergétiques croissantes (cf section 5.1). Réduire la consommation électrique nécessaire à la réalisation de ses simulations est perçu comme un enjeu important et est, pour beaucoup, une forte source de motivation en faveur du passage au GPU. Cela doit notamment conduire à s'interroger collectivement sur les formes que pourrait prendre le progrès en modélisation OA. La recherche d'approches équilibrées mêlant efficacité (optimisation des codes et de la taille des runs d'ensemble; souplesse d'usage des hiérarchies de modèles et montée en résolution sur des questions bien ciblées) et sobriété (différer voire renoncer à certaines études) doit continuer de mobiliser la communauté nationale qui dispose de multiples atouts pour faire émerger des compromis pertinents et originaux. La place des scientifiques français dans les grandes instances et consortia OA internationaux devrait apporter une bonne visibilité et complémentarité des choix réalisés par la communauté nationale à l'échelle mondiale.

COUPLAGE MODÈLES-DONNÉES D'OBSERVATION

Si de nombreux travaux couplant modélisation, données *in situ* et/ou données satellitaires ont été effectués dans les domaines de la physique, de la biogéochimie et de la biologie (e.g. évolution du trait de côte, dynamique et transport des particules, biomasse, diversité et activité des microorganismes), aucune stratégie d'observation n'a réellement été bâtie en combinant ces trois grands types de données. Afin de maximiser le couplage modèle-données en général, il serait bénéfique que les communautés de modélisation s'impliquent, largement avec les communautés de l'observation dans l'établissement des stratégies de collectes de données. Certaines communautés commencent à se structurer dans ce sens à l'échelle nationale (e.g. Fr-OOS; IR ILICO et ODATIS/DATA TERRA) et la définition de telles stratégies est un des objectifs de plusieurs projets du PPR 'un océan de solutions' et d'un axe du PEPR Bridges. Ces réflexions qui incluent notamment la notion de chantiers régionaux comme 'proof of concepts' ainsi que l'utilisation d'outils 'low cost' ou le développement de la science collaborative/participative sont à partager et surement à élargir au sein des différentes IR.

Les progrès récents tant en observation qu'en modélisation OA (massification des jeux de données satellite et *in situ* disponibles; réalisme des simulations) ouvrent quantité de nouvelles opportunités de passerelles entre les deux types

LE XX^E SIÈCLE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN COURS

Le climat actuel se caractérise par une modification rapide du climat induite par l'activité humaine. L'élévation récente de la température à l'échelle de la planète, mais aussi de nombreuses régions, est maintenant attribuée sans ambiguïté à l'accroissement de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ces attributions se révèlent également pertinentes pour de nombreux événements extrêmes de chaleur, et même de précipitation ou sécheresse, et ont conduit à attirer l'attention sur les risques associés au renforcement des extrêmes dans le dernier rapport du GIEC (2023). À l'échelle régionale, il reste néanmoins de nombreuses zones d'ombre sur le rôle et la façon dont les différents forçages provenant des modifications des teneurs en gaz à effet de serre, des aérosols et de l'utilisation des terres se combinent à la variabilité multi-échelles du climat. De même, les événements passés ont imprimé des variations lentes qui façonnent le climat actuel et affectent la vulnérabilité des différents milieux et régions aux changements en cours. Une difficulté provient également du fait que la période actuelle sert de référence pour comprendre les changements climatiques, alors même qu'elle est déjà fortement perturbée et que certains points de bascule ont peut-être déjà été franchis.

Un enjeu pour les prochaines années sera de tirer profit de la richesse des observations *in situ* et satellite qui caractérise aussi cette période, et ainsi d'apporter une explication quantitative des changements observés. Il s'agira de favoriser des visions systémiques faisant intervenir les différents facteurs, et leur déclinaison de l'échelle de la planète à l'échelle locale (jusqu'à celle des villes) et vice versa. Les

différents défis de la prospective abordent des facettes complémentaires permettant d'approfondir de façon effective la description et la compréhension du réchauffement en cours, incluant le cycle hydrologique. L'amélioration de la compréhension et représentation des processus dynamiques, physiques et biogéochimiques apparaissent dans ce cadre comme un aspect fondamental pour progresser et déterminer le niveau de confiance dans les évaluations et les projections climatiques. Il en va de même de la caractérisation plus fine de l'impact de l'activité humaine sur les émissions de gaz à effet de serre et courte durée de vie, les aérosols, l'évolution des surfaces continentales, et, de là les cycles de l'énergie, de l'eau et du carbone aux échelles régionales et globales. Les synergies entre les différentes thématiques seront renforcées pour permettre une meilleure intégration des nombreux jeux d'observations, de la modélisation et des simulations climatiques dans une vision système Terre. Les meilleures caractérisations des interactions d'échelles, spatiales et temporelles, permettront aussi de mieux appréhender les impacts du changement climatique et l'identification des différentes rétroactions pouvant être induites par les impacts eux-mêmes suivant les échelles mises en jeu.

Ces objectifs rejoignent ceux des actions du programme national LEFE, et ceux du programme mondial de recherche sur le climat (WCRP). De fortes collaborations internationales sur ces sujets sont déjà en place et pourront être renforcées au travers des activités phares de ce programme auxquelles elles contribuent directement

d'approches (méthodes de contraintes observationnelles, optimisation de réseaux d'observations...), pouvant aller jusqu'à des approches complètement hybrides (« data-driven modelling »). Tirer parti de ces opportunités implique de lever certains verrous (ex: l'assimilation couplée océan-atmosphère, assimilation des variables nuageuses, des variables biogéochimiques marines, ou des proxys paléoclimatiques dans les modèles du système Terre) et passera, en bonne partie, par une utilisation plus poussée de l'IA. Ceci devrait notamment permettre de mieux comprendre les origines des écarts modèles-données.

En paléoclimat, le renforcement des liens modèle-données nécessitera aussi l'intégration des traceurs géochimiques et des raffinements de la représentation des processus biologiques dans les modèles ainsi que la réalisation de simulations transitoires longues, permettant d'explorer des transitions climatiques (cycles glaciaires/interglaciaires, transition mi-Pléistocène), permettant d'explorer des transitions climatiques (cycles glaciaires/interglaciaires, transition mi-Pléistocène).

L'intégration des données de type OMIC dans les modèles de biogéochimie va nécessiter de poser des questions fondamentales notamment sur les liens entre biodiversité et flux d'éléments chimiques.

Structuration

PROGRAMMES NATIONAUX - PN

Le **programme national LEFE** (Les Enveloppes Fluides et l'Environnement) a une importance critique à la fois pour soutenir des projets à risque et pour structurer la communauté autour de projets collaboratifs de grande envergure et permettre des avancées scientifiques. LEFE permet également d'animer la communauté océan-atmosphère. Son rôle d'incubateur, pour démontrer la faisabilité d'idées novatrices, voire de rupture, ou de structurer des équipes multi-laboratoires, est fréquemment invoqué comme ayant permis la montée d'échelle vers des projets mieux dotés comme l'ANR et les projets PIA (PEPR notamment). À titre d'exemple, le montage du projet PEPR TRACCS s'est notamment construit dans la continuité de programmes LEFE passés (e.g. MISSTERRE, DEPHY) qui avaient permis au préalable de structurer la communauté nationale autour de la modélisation climatique. Néanmoins, le déclin du nombre de soumissions au programme LEFE depuis 5 ans, exacerbé en 2022, interroge, son origine étant très probablement multifactorielle et conjoncturelle. Certaines évolutions récentes comme le doublement du taux de succès à l'ANR, l'émergence des PPR et PEPR, ont certainement participé à la baisse des soumissions de projets. La conjoncture des années COVID, et plus récemment du renchérissement des coûts des carburants, ont également limité le nombre de campagnes océanographiques, et réduit les demandes LEFE associées. D'autres raisons structurelles sont également invoquées comme la complexité et la longueur du temps de traitement des demandes de projets LEFE, l'impossibilité de financer des ressources humaines (du stage de Master au post-doc) ou enfin la multiplication des opportunités de financements notamment localement (par ex. EUR, Instituts d'université) et présentant un taux de réussite élevé. Plusieurs axes d'évolution du programme national LEFE ont été proposés pour que celui-ci continue à soutenir des projets scientifiques singuliers, avec une dimension nationale, et contribue à structurer la communauté nationale en océan-atmosphère.

Finalement, trois fonctions essentielles des programmes nationaux pilotés par la communauté ont été identifiées et discutées :

- Il s'agit d'abord d'en faire un véritable outil permettant d'impulser la mise en œuvre des prospectives. Même si en dehors des programmes d'envergure (PIA, Europe) il est clair que les projets financés par les PN ne permettent pas – à eux seuls – de pousser une priorité, leur caractère incitatif, leurs vertus structurantes et leur potentiels de démonstration en font des leviers irremplaçables pour monter vers des financements plus transformants. Pour cela leurs appels d'offres doivent être fortement alignés sur les enjeux collectivement identifiés par les prospectives.
- Cependant, les PN sont identifiés comme des lieux de prise de risque où des concepts innovants et des hypothèses incertaines peuvent être expérimentés et bénéficier de l'accompagnement des conseils d'actions. Une part mineure mais non-négligeable de l'appel d'offre doit donc pouvoir rester « blanc ».
- Enfin, les PN et leurs conseils d'actions sont reconnus comme parmi les mieux positionnés pour animer la communauté entre deux prospectives. Il est donc naturel que ces conseils d'actions – outre leur rôle d'évaluation et de suivi des projets – puissent initier des manifestations d'animations.

L'appel d'offres du LEFE doit être restructuré et simplifié pour mieux répondre aux enjeux scientifiques, techniques et sociétaux identifiés dans cette prospective. Si LEFE doit mieux devenir un outil de mise en œuvre de la prospective alors les défis et axes prioritaires devraient servir de grille d'analyse pour constituer les priorités des actions voire en redessiner les contours. L'émergence de programmes nationaux d'envergure (PPR, PEPR) doit être considérée par le programme LEFE. Il s'agit de construire une complémentarité avec ces grands programmes de recherche, notamment sur les projets émergents, et ceux collaboratifs.

Pour favoriser la valorisation des moyens lourds engagés lors de campagnes ou de l'acquisition de longues séries temporelles par les SNO et IR du domaine océan-atmosphère, l'appel d'offres du LEFE pourrait cibler l'exploitation des données acquises et peu exploitées, par exemple en finançant des data meeting affichant à leur issue de clairs objectifs de publications. De telles actions sont déjà mises en place dans d'autres champs disciplinaires, et offrent la possibilité aux acteurs de finaliser des data papers par exemple, d'ouvrir les données à une communauté large, d'effectuer des analyses ou réanalyses avec de nouvelles méthodes, ou de croiser plusieurs approches dépassant le champ initial d'investigation. La mise en place de ce support devra faire l'objet d'un échange avec les pôles de données, pour s'assurer d'une mise en œuvre répondant aux évolutions rapides du domaine émergent de la science des données.

Afin de mettre en œuvre une politique incitative vertueuse et permettant de contribuer à l'atteinte des objectifs de réduction de l'empreinte environnementale de nos recherches, les évaluations devront prendre en compte la réduction au strict nécessaire des missions, et inciter aux déplacements les moins impactants. Cette évaluation devra intégrer des missions incompressibles indispensables aux avancées de notre champ (notamment campagnes de terrain) et aux échanges nécessaires pour la construction de réseaux (doctorants, jeunes chercheurs, ateliers thématiques, etc.).

Un effort de communication majeur doit être entrepris par les parties prenantes du programme LEFE (organismes et CS) pour décrire le programme tant dans ses attendus au regard des défis du domaine océan-atmosphère dans cette prospective, qu'à son fonctionnement et taux de succès. Plusieurs outils seront engagés pour cet effort de communication : (i) la page web du site (CNRS-INSU) inclura les fiches de rendu des projets, des ateliers et colloques organisés par les différents CS LEFE, des actualités relatives aux projets financés par le LEFE (ii) des présentations des actions de LEFE dans les laboratoires OA seront également organisées.

En ce qui concerne le **Programme National de Télédétection Spatiale** (PNTS) la situation est significativement différente de celle du LEFE en étant nettement plus spécialisée dans ses approches et jouissant d'un positionnement très complémentaire au programme TOSCA du CNES. Il a largement contribué à des avancées dans le développement d'approches originales de traitement de données satellitaires - dépassant le strict domaine océan-atmosphère. Il doit prendre en compte les évolutions du paysage de l'écosystème des données et des approches émergentes. La création du pôle de données DataTerra, offrant de nouvelles capacités de stockage, de calcul, et de développements doit être l'occasion de renforcer la contribution du PNTS aux chaînes de traitements, notamment par l'apport des approches issues des mathématiques appliquées et des sciences des données, en lien avec l'action MANU/IA.

Plusieurs axes prioritaires plus spécifiques ont été proposés pour structurer les recherches liées au PNTS, sur la poursuite des recherches sur les algorithmes d'inversion des données satellitaires pour une meilleure compréhension des processus physiques, sur le développement de méthodes novatrices visant à quantifier et à réduire les incertitudes sur les produits géophysiques dérivés par satellite, sur la modélisation du transfert radiatif pour la préparation ou l'exploitation des missions spatiales en cours ou à venir. Garantir l'homogénéité des séries temporelles et favoriser le développement de techniques pour approfondir l'exploitation des données spatiales par synergie entre plusieurs capteurs satellitaires, mais également l'utilisation conjointe de données issues de capteurs spatiaux et de mesure *in situ* et aéroportées constituent des enjeux que le PNTS doit pouvoir soutenir.

Enfin, un produit à valeur ajoutée ne peut être valorisé que par les utilisateurs qui l'exploitent. Le PNTS suggère d'encourager, peut être par le biais des pôles de données, des rencontres ou des projets permettant d'établir des liens entre les scientifiques et une partie des utilisateurs potentiels y compris institutionnels. Ces échanges permettraient un meilleur usage des données et une meilleure compréhension des attentes.

L'exploitation des méthodes développées en sciences de la donnée et/ou en mathématiques appliquées (par exemple impliquant les techniques de l'Intelligence Artificielle), pour-

rait être stimulée par un rapprochement entre les communautés PNTS et LEFE-MANU/IA par le biais de journées d'échanges sur les méthodologies et techniques d'analyse (atelier) ou de projets communs. De la même manière, pour l'implémentation et la diffusion d'algorithmes opérationnels d'inversion validés dans les chaînes de traitement de données satellitaires, le rapprochement entre les scientifiques (développeurs d'algorithmes), les pôles de données abrités au sein de DataTerra et les plateformes de technologies de l'information (calcul scientifique et moyens informatiques) disponibles dans les organismes pourrait être mis en place dès à présent via des ateliers communs.

À moyen terme cependant, le programme LEFE pourrait être renforcé d'une part, et étendu vers un programme transverse d'autre part. En effet, l'appel d'offres « Instrumentation innovante » mis en place en 2021 par la DIRO du CNRS-INSU constitue une première expérience de programme transverse à l'ensemble des communautés OA, SIC, AA et TS. Force est de constater que certaines actions du LEFE comme MANU et une part du PNTS voient aujourd'hui leur champ d'application étendu au-delà du domaine océan-atmosphère ce qui est le signe d'un véritable succès et un gage de richesse. Sur le modèle de l'AO IIT, un programme transverse sur les méthodes mathématiques et la science des données en sciences de l'univers pourrait voir le jour à terme.

Travailler l'attractivité des programmes nationaux pourrait également passer par une anticipation du calendrier de soumission avec une publication de l'appel d'offre au 1^{er} juin plutôt qu'au 1^{er} juillet afin :

- de permettre la constitution des consortia en dehors des congés d'été ;
- d'alléger la période du 1^{er} septembre au 15 septembre (date de clôture des AO), permettant ainsi aux enseignants-chercheurs qui préparent la rentrée universitaire de plus facilement participer aux appels d'offres.

Les avancées nécessaires pour aborder les défis scientifiques de cette prospective nécessitent des ressources humaines en renfort des chercheurs, enseignants-chercheurs et personnels d'appui à la recherche, et la formation d'une génération de jeunes chercheurs impliqués dans ces défis. À défaut de pouvoir financer des CDD et des thèses, le soutien aux projets de recherche des programmes nationaux devrait intégrer des gratifications de stage de recherche de Master 2. Un tel dispositif pourrait permettre à une partie des étudiants de continuer en thèse de doctorat. Si il était mis en place, par exemple à hauteur de plusieurs dizaines de bourses, on aurait un effet de levier avec véritable impact sur la formation de futurs jeunes chercheurs.

INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE

Les infrastructures de recherche du domaine océan-atmosphère viennent coordonner et animer les services labellisés de leur périmètre au premier rang desquels les services natio-

Les moyens aéroportés dédiés à la recherche en France sont mis en œuvre par le Service des Avions Français Instrumentés pour la Recherche en Environnement (SAFIRE, devenu IN-AIR/SAFIRE) créé en 2005 entre CNRS, Météo-France et le CNES. Il a quatre objectifs :

- Acquérir des données à différentes altitudes lors d'expériences coordonnées pour améliorer nos connaissances sur les processus contrôlant l'évolution de notre environnement (physique et chimie de l'atmosphère, surfaces continentales et océaniques...) et en premier lieu le climat.
- Conduire les campagnes de calibration/validation des nouveaux instruments embarqués sur satellite et l'étude de concepts innovants d'instruments préfigurant de futures missions spatiales françaises ou européennes.
- Participer à des projets de R&D sur la thématique aéronautique / étude du givrage en vol, des traînées de condensation, développement de nouveaux capteurs...
- Permettre des missions régaliennes de surveillance des risques et de la navigabilité de son espace aérien, par exemple dans le cas des panaches volcaniques.

Jusqu'en mai 2022 et l'arrêt de son unique jet, un Falcon 20, IN-AIR/SAFIRE opérait trois avions instrumentés afin de répondre à l'ensemble de ses objectifs : un Piper Aztec pour

l'échelle locale et une faible charge utile, un turbopropulseur ATR 42 limité à 6 km d'altitude et le Falcon 20.

La souplesse d'utilisation des avions permet de déployer partout dans le monde de véritables laboratoires volants pour l'exploration tridimensionnelle de l'atmosphère et l'exploration des surfaces continentales et océaniques, nécessaire à la compréhension de la météorologie et du climat et la calibration/validation des missions spatiales. Ces observations sont essentielles pour comprendre les processus qui alimentent les simulations numériques du climat mais aussi étudier la qualité de l'air, la surface de l'océan ou les dynamiques des interfaces continentales et côtières.

Disposant du Falcon 20, IN-AIR/SAFIRE était la seule infrastructure française à permettre des mesures in situ en haute altitude et sur de longues distances du milieu atmosphérique. C'était également la seule permettant l'intégration d'équipements scientifiques aéroportés lourds complétant ainsi les systèmes d'observations des missions spatiales du CNES ou des agences européennes.

Pour des raisons budgétaires, son remplacement n'est toujours pas acquis malgré un financement du PIA3 et met en péril la souveraineté Française de la recherche, de l'innovation et des missions régaliennes de surveillance de risque dans son espace aérien.

naux d'observation. Elles ont donc pour mission d'organiser sur le long terme l'observation d'un ensemble de variables environnementales et climatiques essentielles, de mettre à disposition des moyens lourds et/ou complexes et d'organiser et gérer le stockage et la distribution massive et libre des données produites offrant des services d'accessibilité suivant le principe FAIR.

De même que les Observatoires des Sciences de l'Univers forment entre eux un maillage territorial des communautés de l'observation et de leurs enjeux, les Infrastructures de recherche forme un maillage thématique qui non seulement offre des services aux communautés concernées mais en assure l'ancrage avec leurs miroirs européens.

Services nationaux d'observation, Sites Instrumentés, Instruments nationaux, codes communautaires, plateformes sont les briques de base que coordonnent les IR et pour lesquelles elles constituent un environnement de soutien, de synergie et de maturation.

Alors que les financements sur projets rendent très difficiles la mise en œuvre de recherche sur 10, 20, 30 ans ou plus, la compréhension des mécanismes des changements globaux et leurs traductions régionales ou locales imposent un suivi de long terme. **Le « temps long » est donc un enjeu fondamental** de la construction et de la valeur ajoutée des infrastructures de recherche. L'enjeu majeur du XXI^e siècle pour la recherche en sciences de l'environnement, fondamentale ou appliquée, est l'étude sur le long terme des changements, globaux ou plus locaux, de leurs déterminants ainsi que de leurs impacts. Le temps long est nécessaire pour :

- Permettre l'établissement de séries longues indispen-

sables à la compréhension les changements en cours

- Construire les systèmes d'observation et d'expérimentation, fiabiliser les mesures, faire mûrir les technologies
- Mettre en place les filières FAIR opérationnelles
- Renforcer les liens avec les utilisateurs grâce à une utilisation simplifiée par des services dédiés, et grâce à une formation des utilisateurs
- Développer des systèmes d'observations répondant aux enjeux sociétaux et aptes à répondre aux demandes des décideurs, et conformes à la convention cadre de l'Accord de Paris (mesures de mitigation et adaptation au changement climatique) en accord avec le Global Climate Observation Implementation Plan¹.

Pour permettre ce temps long, et conformément à la première recommandation du livre blanc d'AllEnvi 2020-2030, il faut assurer la durabilité des IR, apporter des gages de pérennité, via un soutien financier et une gestion prévisionnelle des emplois et carrières adaptés.

La mise en réseau et la coordination des SNO (et autres services labellisés) au sein des IR répond également à l'amélioration nécessaire de l'interface entre producteurs de données et utilisateurs d'une part et à la nécessaire animation scientifique entre les services d'observations voire à terme entre les IR.

La FAIRisation et l'interopérabilité des données ne passent pas seulement par une approche numérique (qui reste essentiel dans le processus), dès la collecte des données elle passe par la diffusion de pratiques harmonisées, la production d'incertitudes, l'étalonnage homogène des données, l'établissement de métadonnées robustes... C'est là l'un des rôles fondamentaux des IR.

1- (<https://gcos.wmo.int/en/publications/gcos-implementation-plan2022>)

Par ailleurs, la mise au services des utilisateurs des données et des services n'est pas seulement une affaire de pôle de données, elle passe aussi par la communication autour de ces séries, leur capacité à évoluer en fonction des besoins, l'établissement de conditions d'accès claires et opposables aux services et le calculs de coût d'accès transparents et auditables pour ces mêmes services. L'enjeu étant que les programmes de recherche (y compris les PEPR et autres grands projets de l'État) puissent pleinement bénéficier des installations des IR tout en payant le juste prix et contribuant ainsi justement à maintenir ces installations.

Dimensionner en conséquence les moyens nationaux, financiers et humains, est crucial pour que la France maintienne sa capacité logistique, ses collections et ses systèmes d'observation et d'expérimentation, ses outils de simulation, à haut niveau et garde sa place dans la stratégie européenne et internationale dans le domaine océan-atmosphère et plus largement celui des sciences du système Terre et de l'environnement. Par exemple, le caractère stratégique du renouvellement des très gros équipements a été souligné pour les avions, les bateaux et les calculateurs.

Les succès à l'appel des Equipex+ du PIA-3 a montré que les IR nationales pouvaient répondre aux grandes priorités de l'État. Il est à souhaiter que ces opportunités puissent être renouvelées à échéance 2029 afin de permettre les indispensables investissements. En effet, même dans leur phase ERIC, le modèle économique des IR, ne permet que marginalement la stratégie d'investissement nécessaire à soutenir le

développement des observations et à maintenir l'attractivité de leurs services.

Le temps long associé aux activités des IR s'appuie sur l'implication de personnels qui doivent connaître une réelle reconnaissance de leurs activités réalisées dans ce cadre. Ce besoin concerne toutes les ressources humaines impliquées, chercheurs, enseignants-chercheurs, dont les physiciens de la CNAP, ingénieurs et techniciens.

Les infrastructures de recherches pourraient s'engager dans des analyses de leur besoin en termes d'emplois et de compétences pour leur fonctionnement propre et pour les SNO de leur périmètre (en lien avec les OSU concernés). Des fiches de poste dédiées décrivant toutes les fonctions nécessaires au bon fonctionnement des IR pourraient être rédigées. Elles permettraient une meilleure cartographie de ces activités, faciliteraient le renouvellement des personnes en charge de ces activités, pour garantir le bon fonctionnement des IR sur la durée. Les tutelles en retour pourraient s'engager à considérer les priorités des IR de la même façon - et transversalement - qu'elles considèrent les besoins des unités et des OSUs.

En termes de structuration, l'implication française dans les infrastructures européennes s'appuie en général sur des réseaux nationaux bien structurés et coordonnés. Certaines spécificités françaises peuvent constituer de véritables atouts dans la construction européenne des infrastructures de recherche, notamment du fait de la couverture géographique

Dans le cadre de cette prospective océan-atmosphère, la CSOA (Commission Spécialisée océan-atmosphère) a sondé les utilisateurs de la Flotte Océanographique Française (FOF) par un questionnaire portant sur son fonctionnement. Celui-ci abordait les aspects allant du dossier de demande à la réalisation de la campagne ainsi qu'aux dossiers post-campagnes, et ce pour les trois flottes : navires de station, navires côtiers et semi-hauturiers et navires hauturiers. Pour chacune des flottes, une cinquantaine de réponses permettent de proposer des suggestions d'amélioration et d'optimisation. Les quatre-vingt-dix-neuf réponses complètes apportées au questionnaire montrent une satisfaction générale à plus de 70 % pour les navires côtiers et hauturiers et plus de 80 % pour les navires de station. Les réponses mettent en valeur 1) l'importance des réunions de préparation de mission (navires côtiers et hauturiers), 2) la réactivité du personnel de bord face aux difficultés, 3) la souplesse de la programmation et le cas échéant reprogrammation des navires de station. A contrario, le manque de souplesse voire l'absence de reprogrammation pour les flottes côtières et hauturières, en particulier en cas d'annulation d'une sortie ou mission, peut handicaper les objectifs scientifiques des projets, dont les calendriers peuvent

être disjoints des financements. Le fond de soutien aux campagnes est jugé indispensable, et pourrait être étendu aux campagnes en métropole. Pour la flotte hauturière, le dossier de demande de campagne est lourd et l'interface web capricieuse. Les différents rapports de fin et post-mission sont jugés utiles ou très utiles et la création d'un DOI pour chaque campagne est un progrès significatif dans la gestion des données. Un retour sur le rapport d'anomalie(s) serait très apprécié par les utilisateurs. Des problèmes récurrents sur certains navires sont évoqués et le vieillissement de la flotte côtière est mentionné, malgré une nette amélioration dans son entretien et son équipement. Un point de vigilance concerne les treuils et les câbles CTD sur les navires hauturiers, insuffisamment maintenus en bon état. Le changement d'armateur pour les navires côtiers est jugé plutôt positif quant à la rigueur (préparation, logistique, déroulement) et le rafraîchissement des navires mais négatif quant à la souplesse ((re)programmation, à bord, annulations de déploiement, journées, missions). Le bilan général de la mise en place de la FOF apparaît donc comme positif pour la communauté, et les pistes ébauchées pour l'améliorer seront à prendre en compte dans la prospective de renouvellement de la FOF s'ouvrant en 2023-2024.

des sites instrumentés et les méthodes et technologies de mesure et d'observation. Quand la structuration nationale manque, il faut de nouvelles candidatures sur la feuille de route nationale, pour contribuer à haut niveau à la structuration européenne. Dans le cas où la structuration européenne n'est pas encore en place, il faut travailler la feuille de route européenne : entrer dans une stratégie concertée entre les tutelles pour impacter la programmation européenne en s'appuyant sur les dispositifs du MESRI (PCN, GTN...) et sur les groupes miroirs est alors indispensable.

Dans la période à venir, il est clair que le portage à l'Europe de l'IR ILICO dans le cadre d'une proposition JERICO-RI sera forcément renouvelée compte tenu de son échec à l'inscription sur la feuille de route ESFRI doit être une priorité.

De même, la possibilité de portage d'un concept d'infrastructure européenne aéroportée couplant avions, ballons et drones sur le modèle de l'IR national IN-AIR doit être étudiée en saisissant toutes les opportunités que nous offrira le programme de travail de la commission européenne.

Enfin, travailler à la construction d'un miroir Européen à CLIMER - par exemple sous la forme d'une AISBL - afin de capitaliser sur les avancées des initiatives IS-ENES - Infrastructure for the European Network for Earth System Modelling- doit aussi être dans la feuille de route de la communauté.

Au niveau national, la reconstruction d'un service glider - qu'il soit rattaché à la FOF ou non - reste une option ouverte à la communauté qui déploie, équipe et opère ces drones sous-marins. Le groupe de travail mis en place à l'issue de la fermeture du service glider de la division technique semble avoir établi qu'il existe une communauté d'utilisateurs suffisamment large pour justifier un accès communautaire à ces vecteurs. Il faudra donc dans les années à venir que les principaux intéressés se déterminent soit à mettre en synergie leurs expériences, leurs développements et les données correspondantes au sein d'un modèle de type IR doté d'un modèle économique soit, au contraire, à faire perdurer un modèle de type équipement propre de laboratoire.

Le mécanisme de labellisation des SNO/SI/IN/CC fait intervenir les commissions spécialisées (CSOA, CSSC, CSTS...). La récente homogénéisation de définitions des services et des critères de labellisation va permettre une meilleure cohérence du dispositif en particulier pour les services labellisés multidomains (IR ILICO, IR EMSO, SNO CTOH, SNO CORAIL).

Les commissions spécialisées doivent avoir les prérogatives pour évaluer les IR au-delà de leurs briques de base. Si le GT infra de l'alliance ALLiEnvie évalue les IR du domaine, il s'agit essentiellement d'une évaluation du point de vue des tutelles. La pertinence scientifique de leur organisation, la qualité de leur animation scientifique ou encore leur adéquation avec les grandes questions des prospectives doivent faire l'objet d'un regard et de recommandations de la part des CS.

Financement de l'exploitation scientifique. Les équipes exploitant les données produites par les infrastructures peinent souvent à réunir les moyens financiers et humains nécessaires à la conduite de projets scientifiques, et notamment aux développements de méthodes d'analyses innovantes (intelligence artificielle) permettant une exploitation plus avancée des données. Les appels d'offres dédiés de l'appel à projets pilote de l'ANR Exploitation scientifique des données des infrastructures de recherche (ESDIR), offrent aux utilisateurs de la FOF une telle opportunité, qui mériterait d'être pérennisées, et généralisée à d'autres IR par l'ANR, mais également à une autre échelle par les programmes nationaux. Assurer une mise en cohérence entre les calendriers des appels à projets de l'ANR et ceux gérant l'accès aux gros moyens logistiques (bateaux, avions, bases polaires, plateformes...) pourrait faciliter le travail des chercheurs utilisateurs des IR.

Les IR doivent rester au niveau de l'état de l'art et maintenir une dynamique d'échanges scientifiques en leur sein, en gardant des moyens pour tester de nouvelles technologies, pour s'intéresser à de nouvelles variables, pour explorer de nouveaux espaces ou tout simplement pour mieux suivre - ou à moindre coût - les variables en cours. Des évolutions sont nécessaires pour répondre aux besoins des utilisateurs et aux attentes sociétales, comme par exemple :

- Faire évoluer les couvertures géographiques (du niveau international jusqu'au maillage à l'échelle des villes) en s'appuyant aussi sur une meilleure interaction avec la modélisation pour optimiser les réseaux aux échelles spatio-temporelles visées (voir section *modèles-données* p.118)
- Développer de nouveaux capteurs et plateformes, adossés potentiellement à plusieurs IR
- Élaborer des nouveaux services en support aux missions (European Green Deal, Climate Adaptation Strategy) à travers le développement de services transverses multi-IR.
- Evoluer en matière de données et services dans le cadre d'EOSC (notamment «Virtual access», «Virtual Research Environments»)
- Développer des interfaces entre environnement, alimentation/nutrition, transition énergétique et santé dans son périmètre le plus large (*One Health/Eco-Health*)

Comment renforcer les interfaces entre les IR ?

Les complémentarités entre les infrastructures de recherche, qu'elles soient d'observation, de simulation, de logistique et de données sont une réalité, mais méritent d'être renforcées par une série d'actions complémentaires aux interfaces entre IRs.

Les interfaces d'accès aux données destinées aux utilisateurs sont nombreuses, et encore peu homogènes. L'approche sectorielle de la construction des IR rend difficile les études pluridisciplinaires aux interfaces de plusieurs compartiments de l'environnement, telles que les études sur le climat, les approches écosystémiques intégrées, les interactions océan-atmosphère, ou atmosphère – surfaces continentales. De plus, la capacité à exploiter conjointement les produits de simu-

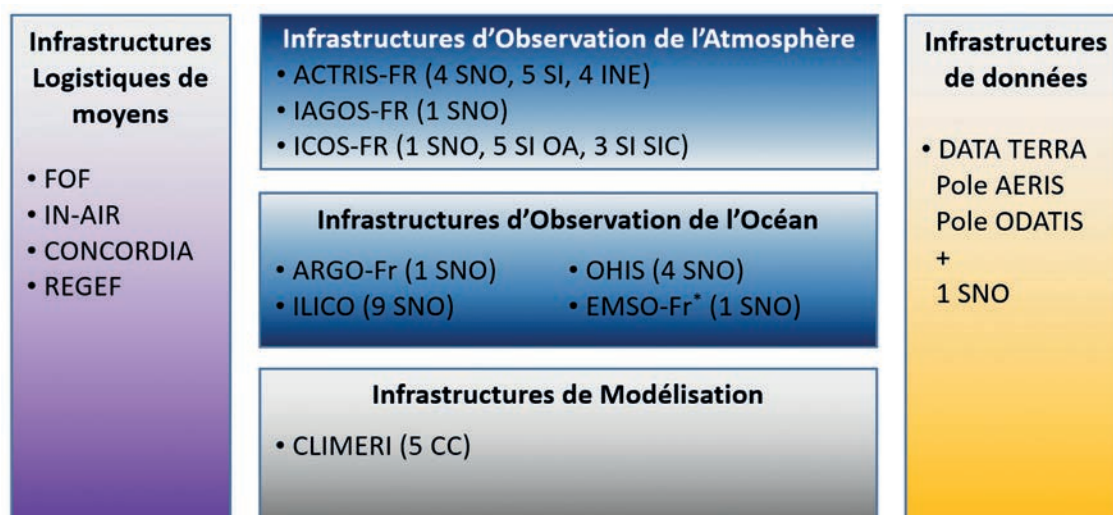


Figure 17: Structurations des infrastructures de recherche française du domaine océan-atmosphère

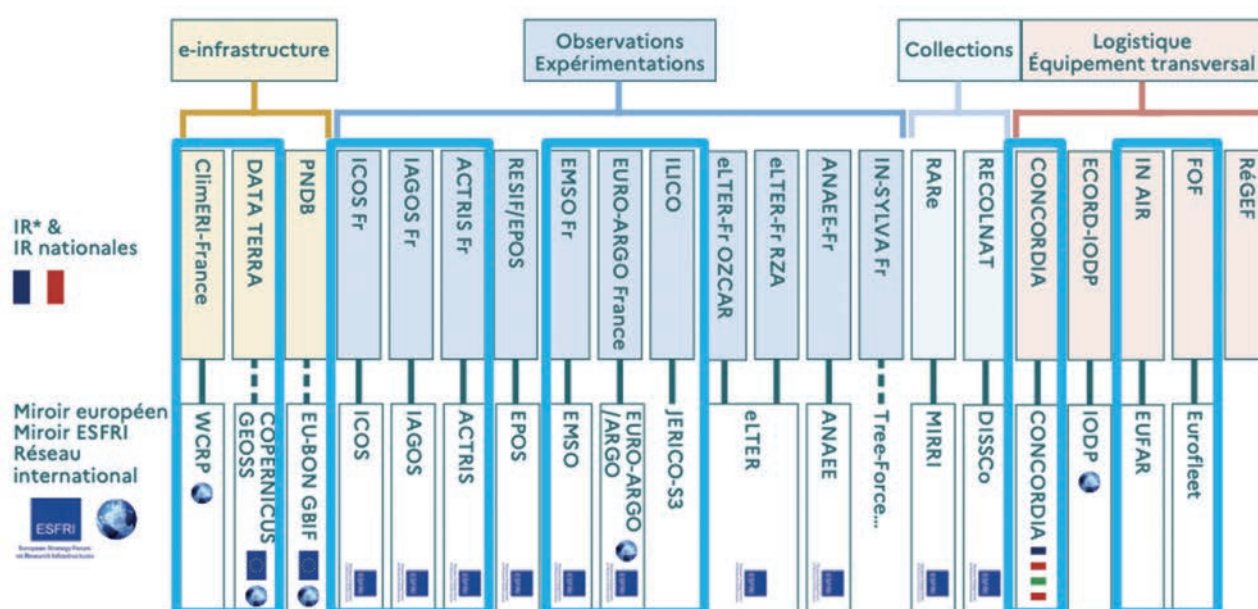


Figure 18: Structurations des infrastructures de recherche française du domaine océan-atmosphère (contour bleu) dans le paysage des IRs de l'INSU et leur pendant européen lorsqu'elles existent.

lations numériques et les produits d'observations est aussi un domaine où des progrès sont nécessaires (voir p.118 *modèle-données*; livre blanc paléo).

Les liens entre les IR d'observations et de simulations numériques du domaine océan-atmosphère et les programmes spatiaux d'observation de la Terre pourraient aussi bénéficier d'une réflexion transverse, d'une part pour renforcer la visibilité des activités des IR auprès des agences spatiales française et européennes, et d'autre part pour faciliter l'exploitation conjointe des données *in situ*, spatiales et de simulation. Il s'agit ici d'actions définies dans le plan d'implémentation du Global Climate Observing System, qui ont été aussi soulignées lors de la 2^{de} Conférence des observations du climat (Octobre 2022) et de la décision relative prise à la COP27 (<https://unfccc.int/documents/624131>).

Le besoin de produits directement utilisables par la société apparaît de plus en plus. Ici, il paraît nécessaire de renforcer

les interactions avec les sciences humaines et sociales afin d'enrichir les données et/ou de mettre celles-ci plus au service de thématiques d'intérêt sociétal. C'est un domaine où le partage, entre les IR, de savoir faire sur les liens sciences – société serait bénéfique.

L'exploitation plus large par le secteur privé de services (par ex. produits spécifiques dérivés de données publiques) issues de la recherche publique, requiert une réflexion nationale sur le modèle économique de ces services de recherche dans le domaine sciences du système Terre et de l'environnement (voir encart *solution d'actions*).

Evolution des Infrastructures de Recherche

La période qui s'ouvre présente un certain nombre de défis

et de projets transformants pour les infrastructures de recherche du domaine océan-atmosphère (Figures 17 & 18). En résonance avec la prospective scientifique décrite plus haut, ils se déclinent de manière spécifique pour chacune des IR.

Pour l'IR ICOS-France, structurant des réseaux de mesure du cycle des gaz à effet de serre, la trajectoire à venir comporte deux mouvements remarquables susceptibles de modifier de manière substantielle le périmètre de ses services. Il y a d'abord, pour ICOS-Atmosphère, l'extension vers les mesures de profils et colonnes totales pour le lien vers les observations spatiales. Cette évolution vers des mesures verticales de GES s'accompagnera du renforcement des liens avec IAGOS. Dans le même temps et dans la dynamique des projets européens PAUL et Green Deal RI-UrBAN, le périmètre de l'IR ICOS se verra étendu vers le développement de services pour le CO₂ anthropique en milieu urbain. Ce mouvement est également l'occasion d'un rapprochement avec ACTRIS mais aussi avec des acteurs institutionnels comme la Ville de Paris.

Ces deux évolutions viennent finalement alimenter le développement d'une chaîne d'estimation des flux de GES nationaux et régionaux, en complément des inventaires et en préfiguration de futures missions spatiales (MERLIN, Micro-CARB.)

Pour l'IR ACTRIS, responsable de l'observation et l'exploration des aérosols, des nuages et des gaz réactifs et de leurs interactions, les évolutions sont organisées dans le cadre de projets structurants en synergies avec les autres IRs du domaine atmosphère (ICOS & IAGOS) dans la perspective d'une structure de gouvernance commune. Les actions du projet EQUIPEX/Obs4Clim ont pour but de s'interroger sur l'observation de nouvelles variables comme les bioaérosols ou l'ammoniac ou encore d'intégrer une nouvelle génération d'instruments (e.g. Micro-Capteurs, mini-Lidars) afin de mieux documenter la variabilité spatiale et les déterminants de la composition atmosphérique. Il s'agit également de développer la dimension internationale d'ACTRIS avec l'implémentation de sites en Afrique, en Bolivie et en Terres Australes jusqu'à soutenir la structuration de l'observation en Afrique dans le cadre du projet européen KADI. Par ailleurs, le développement et l'évaluation de services spécifiques complémentaires ACTRIS (assurance qualité, attribution des sources, dynamique atmosphérique) vers les problématiques urbaines font l'objet du projet RI-Urbans quand le projet AtmoAccess vise à développer une stratégie d'accès durable à l'ensemble des composantes de l'IR élargissant notamment le panel d'utilisateurs potentiels.

Avec la participation à ces mêmes projets, l'IR IAGOS prévoit en outre une extension vers de nouveaux avions commerciaux notamment l'A330neo et l'A350 et le développement d'une nouvelle génération d'instruments pour la mesure des gaz réactifs, des gaz à effet de serre et des aérosols.

Pour l'IR Argo-France, qui coordonne la collecte des données physico-chimiques et biologiques à l'intérieur de l'océan à l'aide d'une flotte d'instruments robotisés, le point critique concerne la consolidation des extensions vers l'océan profond (Argo-Deep: 4000) et la biogéochimie (BGC-Argo). Les principales évolutions à venir (dans le cadre de l'EQUIPEX+ Argo 2030) concernent l'extension vers les abysses (6000m) et vers des flotteurs avec des capteurs plus biologiques (Eco-BGC-Argo, équipés d'UVPs, capteurs d'irradiance hyperspectraux et micro sonar). Travaillant à réduire son empreinte environnementale, l'IR Argo - dont 50% des déploiements des flotteurs est assuré par l'IR* FOF en saisissant déjà l'opportunité d'autres campagnes - travaille à la possibilité d'utiliser des voiliers cargo pour déployer, mais aussi récupérer, le plus grand nombre de flotteurs. La distribution des données d'Argo est assurée par le pôle ODATIS de l'IR DataTerra, mais la société civile MERCATOR Océan International (MOI) joue un rôle important dans leur chaîne de traitement en permettant leur assimilation. Il y a un enjeu extrêmement fort à préserver cette chaîne de traitement dans les conditions actuelles avec la transformation programmée de MOI en organisation internationale.

L'IR EMSO-France est l'infrastructure de recherche qui met en œuvre les observatoires du fond de mer et de la colonne d'eau. Infrastructure distribuée, EMSO est suivie pour le CNRS-INSU par le domaine Terre Solide mais nombre de ses variables et de ses questionnements intéressent la communauté océan-atmosphère. EMSO est structuré par site et sa prospective fait apparaître une extension vers d'autres sites (e.g. Mayotte, Nouvelle Calédonie), d'autres variables (ex. biodiversité via les outils d'imagerie et de génomique). Son intérêt croissant pour la biodiversité s'accompagne d'interactions renforcées avec EMBRC pour l'étude de la biodiversité en milieu profond.

L'IR littorale et côtière ILICO a pour objectif d'observer et de comprendre les milieux et les écosystèmes littoraux et côtiers dans leur globalité. Composé de 9 SNO largement déployés sur la façade ouest de la métropole et sur la Méditerranée du Nord Ouest, ILICO s'est également développée ces dernières années outre-mer (Antilles, Guyane, Océan Indien, Pacifique). Sa prospective est fortement marquée par cette extension qui est accompagnée par l'émergence du PEPR Bridges dans l'océan Indien et par le récent PPR ciblé sur la réponse aux interactions entre activités humaines, biodiversité et climat, spécifiques aux territoires d'Outre-mer. Cette implantation Outre-Mer doit servir de tremplin vers les pays du Sud. Plus largement, ILICO doit accompagner les différents projets PPR afin d'articuler l'émergence de nouveaux services d'observation qui pourraient y émerger. La zone côtière héberge la plus grande part de l'humanité, l'IR ILICO cherche donc à intégrer à ses observations les communautés des SHS. L'IR ILICO sans y être totalement préparé est concernée par l'ouverture d'un chantier urbain et devra se poser la question de l'intégration de ses questionnements dans celui-ci.

Le projet d'infrastructure OHIS fédère trois SNO hauturiers (PIRATA, SSS et MEMO) et un observatoire de la variabilité en Atlantique Nord (GO-SHIP/OVIDE) et vient compléter l'indispensable pavage thématique des IR océaniques (avec Argo, ILICO et EMSO). Complétant les observations des autres IR de l'océan hauturier par des mesures multi-plates-formes ciblées sur les courants de bord, les régions subpolaires, les régions divergentes et l'interface air-mer, elle devra assurer la structuration de ces composants pérennes pour harmoniser leurs stratégies et priorités. Les enjeux sont importants notamment en ce qui concerne l'harmonisation du carbone océanique hauturier. Son inscription sur la feuille de route du MESRI doit rester une priorité pour les organismes - y compris pour assurer la cohérence de la construction du **FrOOS** (**French Oceanic Observing System**, cf plus bas).

La question de **l'observation du carbone océanique** est une question de toute première importance scientifique qui nécessite une synergie accrue des infrastructures de recherche marines et de l'IR ICOS et peut-être une organisation spécifique. L'océan est en effet le deuxième puits de CO₂ du système Terre. Il présente à ce titre des potentialités énormes de rétroaction sur le changement climatique. Si la surface de l'océan est en échange permanent avec l'atmosphère et si ses marges reçoivent continuellement les apports continentaux, l'océan n'en reste pas moins un compartiment tri-dimensionnel. Par ailleurs, le CO₂ une fois dissous ne peut plus être considéré comme une espèce inerte. Fortement impliqué dans les équilibres acido-basiques et dans la production de biomasse, il faut en comprendre la chimie mais surtout son accumulation biologique et les interactions avec les conditions physiques et la dynamique océanique pour en comprendre les flux à l'interface air-mer qui sont essentiels à la trajectoire de l'effet de serre.

Si la quantification de ces flux relève de la partie « Océan » de l'IR ICOS, des observations et les compétences indispensables ont été développées dans les quatre IR océaniques. De plus, pour espérer arriver à l'interopérabilité totale de ces données, il est indispensable d'échanger sur les pratiques, les protocoles, les matériels, les standards... autour de la mesure de PCO₂ ou du système carbonate afin de créer une véritable communauté de la mesure du carbone océanique. Or ces savoirs et ces savoir-faire sont encore trop dispersés même si un CES d'ODATIS (voir IR DataTerra plus bas) dédié a récemment commencé à combler un manque devenu trop évident. C'est un mouvement positif qu'il est indispensable de prolonger et d'installer. Dans la période à venir, il faudra cependant résolument travailler à construire une interface - sans hégémonie - entre l'IR ICOS (IR monothématique multi-compartiment) avec les IR Océaniques (multithématiques et mono-(sous)compartiment).

La question du carbone océanique (ce n'est pas la seule, on pourrait citer la dynamique océanique, sa productivité biologique ou son anthropisation) illustre combien une coordination des quatre infrastructures de recherche sur l'océan est

nécessaire. C'est ce qui est en préparation avec la création du **FrOOS**. Réunissant les IR en question, il permettra une coordination souple tout en permettant l'établissement d'ateliers trans-IR (eg. CO₂ océanique, interaction avec le spatial, synergies opérationnelles, vecteurs émergents...) et modélisation. Adossé aux IR « logistiques » (FOF, SAFIRE, IPEV...) d'une part et de « données » d'autre part (DataTerra, PNDB), il constituera le miroir national de EuroGOOS à l'échelle européenne et la contribution française au GOOS.

À échéance de la période qui s'ouvre, il pourrait être complété par un pilier observation spatiale (réunissant les SNO et les missions d'observation de l'océan depuis l'espace) et par une plateforme de modélisations (réunissant les codes océaniques de la communauté).

L'IR* IN-AIR a été créé en 2022 à partir de la fusion de l'IR SAFIRE et de la division ballon du CNES. Il est encore en montage et vise à proposer à la communauté scientifique des accès aux moyens d'investigation aéroportés que sont les avions de recherche, les ballons (stratosphériques, troposphériques et ballons météo) et les drones. Sa prospective repose largement sur la mise en place de ses instances et notamment la création de groupes de travail - par exemple dédiée à l'instrumentation, au développement de l'offre drones ou encore aux synergies opérationnelles. Il va de soi également que le renouvellement du jet d'altitude est vital pour la préservation des missions essentielles de l'UAR SAFIRE (voir encadré IN-AIR/SAFIRE) et donc à terme pour la pérennité de l'IR IN-AIR d'autant plus que l'ATR-42 arrivera à son tour en fin de vie à l'horizon 2030. La mise en visibilité de l'offre du Piper Aztec est également d'actualité : elle prendra une pertinence accrue dans le cadre du chantier urbain et peut également contribuer de manière originale à l'offre d'enseignement. Pour ce qui est de l'offre ballon, dans la lancée de ce qui a été développé pour le TransNational Access (TNA) du projet européen HEMERA, il y a des enjeux forts à développer un modèle économique qui intègre des coûts d'accès auditables ouvrant la possibilité de financements de projets ANR, d'ERC, de projet Européens...

L'IR* Concordia, station de recherche franco-italienne, est la seule station de recherche polaire permanente européenne à l'intérieur du continent antarctique, et intègre les volets d'accès logistiques depuis la station Dumont d'Urville notamment. Parmi les enjeux prioritaires de la station figurent l'adjonction d'un camp de secours à l'IR* (en cours de construction), l'acquisition des moyens pour subvenir aux besoins de maintenance annuelle (très forts alors même que les budgets sont impactés par l'inflation et les coûts du combustible), et, à un horizon de 15 ans, la rénovation plus complète de la station, habitée depuis 2005. La station abrite des activités d'un périmètre scientifique déjà assez larges (chimie et physique de l'atmosphère, glaciologie, astrophysique, biomédecine...) mais de nouvelles thématiques sont développées au fil du temps (récemment des études sociologiques par exemple). La valorisation des longs jeux de données (plus de 10 ans)

de certains programmes non labellisés SNO est assurée par les centres et pôles de données, comme par exemple la série issue du radiomètre HAMSTRAD, incluses dans AERIS. Leur intégration formelle dans un dispositif labellisé assurant un suivi doit figurer parmi les objectifs des prochaines années. La possibilité de recourir à des énergies renouvelables est à l'étude depuis plusieurs années (éolien, solaire) mais la station reste très dépendante du fuel lourd (antigel) pour des questions de sécurité des personnels. De la même manière, il n'existe pas de possibilités de traitement sur place des déchets qui doivent donc être rapatriés sur la station côtière de Dumont d'Urville, avant d'être envoyés en France ou en Australie pour retraitement. Ces enjeux environnementaux devront faire partie des priorités dans le plan de rénovation de la station, à moyen terme.

L'IR* Flotte Océanographique Française, opère les moyens à la mer pour la communauté française, avec un rayonnement global, soutenant ainsi les recherches polaires et dans les outre-mers. Elle vient en soutien aux observations des services nationaux d'observation intégrés dans les IR ILICO, Argo, OHIS, mais aussi à des campagnes de recherche exploratoires; elle participe aux développements technologiques et assure un service pour l'enseignement dans les filières du domaine océan-atmosphère. Parmi les enjeux forts à venir, les modernisation et renouvellement des navires et des engins, avec en particulier un objectif de réduction de la consommation de combustibles fossiles, fera l'objet d'une prospective en 2023-2024 conduite par l'IR*. La communauté océan-atmosphère bénéficie du fort soutien du Parc National d'Instrumentation Océanographique (CNRS-INSU), ainsi que de l'UAR IMAGO (IRD), pour lesquels une visibilité accrue de leurs rôles est également nécessaire.

Dans ce cadre, les travaux issus de cette prospective font remonter plusieurs éléments importants pour nos recherches en océan-atmosphère, outre l'importance de la construction du navire semi-hauturier.

- Optimiser la programmation en favorisant les campagnes interdisciplinaires soit de manière structurée autour d'objectifs scientifiques communs (comme les campagnes EUREC4A et APERO), ou de manière ad hoc pour optimiser les opérations sur des zones chantiers communes. Ces efforts d'optimisation nécessitent une réflexion par les différentes commissions d'évaluation scientifique (CNFH, CNFC) en lien avec la FOF pour la programmation pour les navires côtiers à hauturiers; et par les comités locaux d'évaluation pour les navires de stations.
- Mutualiser à l'échelle inter/trans-nationale l'accès aux moyens à la mer: la participation de la FOF à EuroFleets+ est actuellement limitée en nombre de jours de temps bateau, et arrive à échéance fin 2023. Un dispositif renforcé de cet accord d'échanges, tout comme des échanges bilatéraux, à l'instar de ceux entre la FOF et l'Amundsen, pourrait favoriser l'accès des scientifiques de notre communauté à des régions difficiles d'accès (notamment les régions polaires), tout en valorisant la flotte auprès de partenaires industriels.

- Mettre en œuvre un navire à faible empreinte environnementale adapté à l'étude des régions intertropicales et outre-mers (cf aire prioritaire tropiques; aire continuum terre-mer; sobriété) apparaît comme un levier pour répondre à des besoins avérés pour des opérations de suivi environnemental afin de répondre aux défis sur les événements extrêmes notamment. L'armement d'un voilier par la FOF a été évoqué comme vecteur pouvant répondre à ces exigences scientifiques et environnementales.

Par ailleurs, l'émergence de capteurs miniaturisés, de vecteurs automatisés vient répondre à la multiplication de besoins scientifiques d'observations continues. L'arrivée de drones de surface autonomes et télépilotes, avec des capacités d'export de matériels scientifiques comparables aux navires de stations, ouvre de nouvelles perspectives que la FOF doit considérer en accompagnant les développements d'une flotte de drones. Selon la trajectoire qu'aura pris la communauté qui déploie des gliders (voir plus haut), il est envisageable que cette offre de drone intègre un tel service de mise à disposition de drones marins.

Les interactions de la FOF avec le pôle ODATIS de l'IR DataTerra sont encore à renforcer pour assurer la complète traçabilité et la mise à disposition de l'ensemble des données issues des campagnes.

Enfin, la mise en service à court et moyen terme de deux nouveaux engins: AUV profond UlyX et ROV+ (2nd ROV profond) permettra d'assurer de nouveaux services pour la communauté OA, en lien avec l'EQUIPEX+ DeepSea'Nnovation et le PEPR Grands Fonds.

Enfin pour l'IR DataTerra dont les services d'animation des liens transverses entre les pôles de donnée AERIS et ODATIS mais aussi le travail sur l'interopérabilité des données et services de l'ensemble du compartiment du système sont essentiels pour la mise en œuvre de la présente prospective, la période qui s'ouvre est fortement structurée par le projet Equipex+ GaiaData qui va permettre de disposer d'un continuum d'infrastructures distribuées (stockage, calcul, traitements de gros volumes de données) mais aussi le développement de services transversaux (entrepôt, catalogage, découverte/exploration, visualisation, traitements à la demande). Il est à noter l'évolution du périmètre scientifique de l'IR Data Terra avec l'intégration de nouvelles thématiques comme la Biodiversité (PNDB deviendra en 2024 un cinquième pôle de données) et l'Agro-environnement.

COMMISSION SPÉCIALISÉE OCÉAN-ATMOSPHÈRE

La Commission Spécialisée océan-atmosphère (CSOA) est une commission scientifique et institutionnelle interorganismes, composée de scientifiques nommés ex qualité par la direction de l'INSU et de représentants des grands organismes partenaires de l'institut. En tant que conseil de la direction de l'INSU, la CSOA donne son avis sur la cohérence des structures et des moyens mis en place par rapport aux

besoins scientifiques du domaine océan-atmosphère et aux priorités résultant de la prospective de cette communauté et de la prospective de l'Institut. Ses principaux domaines d'activité sont donc: le suivi de l'activité des programmes nationaux; l'évaluation des dispositifs des services labellisés; le suivi des demandes de soutien relevant du domaine OA à la division technique de l'INSU; l'évaluation générale de l'adéquation des moyens (financiers, structurels, organisationnels) aux besoins prioritaires de la communauté et enfin la mise en œuvre de la réflexion prospective à l'échelle nationale.

La CSOA se propose d'accompagner le déploiement des éléments de cette prospective, en coordination avec les organismes. Plusieurs points ont émergé de cette prospective et pourraient être mis en œuvre au cours des prochaines années:

- L'évaluation des infrastructures de recherche de son périmètre, en plus des éléments constitutifs (eg. SNOs/SIs/INs) de celles-ci, par la CSOA permettrait d'analyser la pertinence scientifique de leur organisation, la qualité de leur animation scientifique ou encore leur adéquation avec les grandes questions identifiées par la prospective. Cette labellisation devra être synchronisée avec la vague d'évaluation des services labellisés.
- Une animation à l'échelle de la communauté océan-atmosphère, complémentaire du colloque de prospective, auquel participent majoritairement des agents en position de responsabilité, pourrait être proposée en veillant à être complémentaire des actions pilotées par les CS des programmes nationaux. Un colloque, impliquant des jeunes chercheuses et jeunes chercheurs de la communauté, pourrait les accompagner pour la montée d'échelle de leur science émergente qu'ils portent vers l'échelle nationale, et également contribuer à une meilleure connaissance de ceux-ci du paysage institutionnel. Ce colloque pourrait se tenir à mi-mandat.
- Une formalisation des mandats de la CSOA à des mandats de 5 ans, avec renouvellement partiel de moitié tous les 2 ans et demi, en phase avec les colloques de prospective quinquennaux et le colloque de mi-mandat, permettrait d'assurer une mémoire à la CSOA tout en s'assurant du renouvellement de ses membres, en particulier auprès de jeunes chercheuses et chercheurs.
- Le pilotage d'une réflexion sur l'éthique de l'engagement des chercheurs (voir p. 105-106) dont le volet opérationnel est présenté sous forme d'une action en 4 phases, qui pourra s'intégrer dans des actions transverses inter-instituts et inter-organismes.

Sciences, société et transdisciplinarité

Les événements météorologiques ou climatiques récents montrent combien nos sociétés demandent et ont besoin de plus de Science, plus impliquée, plus expliquée, plus proche des décideurs et des porteurs d'enjeux, mais toujours construite sur l'excellence, le temps de la recherche et la liberté de défricher de nouveaux horizons. Transversalité, interdisciplinarité, temps long, instrumentation, calcul et données... des pistes ont été tracées dans plusieurs perspectives, réflexions et retours d'expériences.²

Les questions soulevées sont nombreuses, souvent complexes et peuvent être abordées différemment suivant qu'elles relèvent des compétences du cœur de la communauté océan-atmosphère, ou qu'elles impliquent des interfaces. La nature de l'engagement (sur quoi, avec qui) depuis la thématique ou la question centrale à traiter, jusqu'aux résultats produits ainsi que les rapports entre sciences et entre sciences et sociétés ne sont en effet pas de même niveau : (1) pluridisciplinaire : travail des disciplines en parallèle, chacune sur sa question, autour d'une thématique commune ; (2) interdisciplinaire : la question de départ est commune pour tous ; (3) transdisciplinaire : au travers et au-delà des disciplines classiques avec hybridation des connaissances scientifiques, y compris avec les SHS et en y incluant les savoirs non académiques, supposant de nouvelles méthodes pour « faire science » (sciences participatives, approches sensibles, etc.).

Force est de constater qu'aujourd'hui nous répondons en majorité aux grandes questions transverses et sociétales avec une approche pluridisciplinaire. L'organisation en *work-packages* disciplinaires est sans doute favorisée à la fois par la culture du travail en mode projet en réponse aux appels à projets (ANR, H2020, EQUIPEX, PEPR...), mais également par une culture de travail qui s'ouvre difficilement au-delà de la « zone de confort » des chercheurs. Cela concerne donc en premier lieu ceux qui rédigent les appels d'offres, rarement interdisciplinaires. On peut donc regretter que les travaux transdisciplinaires soient plus rares faute de dispositifs efficaces (et de financements des rencontres dédiées) permettant de co-construire dès le départ les questions scientifiques. Les enjeux scientifiques actuels du domaine OA sont centraux dans les demandes sociétales (i.e. changement climatique, risques etc) mais leur déclinaison, compréhension et appropriation de la part de la société passe par un travail transdisciplinaire avec les Sciences humaines et sociales qui

va au-delà de notre communauté. De plus, pour répondre à ces questions centrales, nous avons de plus en plus besoin d'interagir avec des communautés INSU autres que OA (i.e. Terre interne, SIC) ainsi que hors INSU (i.e. instrumentalistes, statisticiens, mathématiciens, géographes, historiens, sociologues... etc.). La question de la transdisciplinarité en OA est donc essentielle.

Les changements globaux nécessitent le rapprochement entre la communauté scientifique et les acteurs locaux pour trouver des solutions et développer une exploitation soutenable et sobre de l'environnement naturel. On note une participation croissante d'acteurs locaux dans nos projets de recherche sur le milieu océanique, et ce dès leur conception. C'est cette co-construction de l'activité de recherche avec des partenaires extérieurs au monde académique qui ouvre au terme de « services marins ». Les applications typiques incluent des expertises sur des dossiers de conservation (e.g. création d'aires marines protégées) ou de gestion des ressources (e.g. gestion soutenable de la pêche face aux impacts du changement climatique).

Enfin, si le succès de notre démarche, et notamment la confiance que la société accorde à notre parole, tient à la qualité des informations et de la démarche scientifique, elle tient aussi à la capacité à convaincre, et donc dans la capacité de la communauté océan-atmosphère à montrer sa cohérence dans la démarche écoresponsable de la recherche (cf p.103-104).

Les priorités des recommandations suivantes sont à mettre en relation avec les défis scientifiques identifiés par cette prospective, et peuvent être organisés en plusieurs items :

Pour les activités de Médiation

- Accompagner les chercheurs dans les démarches de médiation, méthodologiquement, philosophiquement (épistémologiquement) et financièrement. Permettre le passage d'activités de médiations d'initiatives personnelles à des initiatives coordonnées, mieux partagées et moins chronophages.
- Favoriser les passerelles avec des associations et organismes de médiation (La main à la pâte, les petits débrouillards, Office for Climate Education par ex.)
- Mieux reconnaître, valoriser ces activités dans l'évaluation des carrières au sein des comités d'évaluation (CoNRS,

2- Prospective transverse de l'INSU 2020 <https://www.insu.cnrs.fr/fr/prospective>

Rapport de conjoncture 2019 de la CID 52 Environnements sociétés : du fondamental à l'opérationnel https://rapports-du-comite-national.cnrs.fr/rapport_conjoncture_2019/cid-52-environnements-societes%E2%80%89du-fondamental-a-l-operationnel/

Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires du CNRS (MITI). Appel à projet « PRime » ou l'appel « Osez l'interdisciplinarité » : <https://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/80-nouveaux-projets-pour-le-programme-80prime>

CNAP, CNU notamment), à l'instar de la médaille de la médiation que le CNRS a mis en place depuis 2021.

- Mener une réflexion sur le métier de Médiation et de chercheur. Où commence l'un et où finit l'autre ? Est-ce utile ?

Pour développer la transdisciplinarité, il nous faudra favoriser la diffusion d'informations issues des recherches de notre communauté vers les décideurs, le grand public, et les médias, organiser des workshops scientifiques (et bilatéraux scientifiques/société civile), webinaires ou conférences ciblées sur la co-construction des questions scientifiques dès le départ (pour sortir des relations de domination entre les SVT/SPi et SHS). Un portail dédié par exemple pour partager expériences et informations pourrait permettre de mieux valoriser ces projets et aider les collègues à se rencontrer pour co-construire de nouveaux projets innovants. Cela doit permettre de :

- fédérer une communauté interdisciplinaire et/ou transdisciplinaire de scientifiques ;
- intégrer à cette communauté, ses réflexions et ses activités, les parties prenantes non-académiques impliquées et concernées par ces socio-écosystèmes ;
- partager ou co-construire des méthodes pour dialoguer et travailler ensemble : partager le vocabulaire et les savoirs, croiser les points de vue, et ainsi définir les fronts de science et objets d'études communs et les verrous associés ;
- favoriser et faciliter le montage de projets ;
- diffuser et valoriser les actions de la communauté en favorisant les interactions sciences-sociétés-politiques.

Il nous faudra aussi favoriser la communication au sein de nos communautés : si le CNRS et l'IRD font largement la promotion (via notamment des programmes multi-organismes) du transdisciplinaire, une difficulté reste de faire participer les collègues qui ne sont parfois pas ou peu informés. Mieux faire connaître les outils de la transdisciplinarité et poursuivre les actions menées par le CNRS-INSU avec la création de la DIIRO et de son programme national pour rendre plus transversale encore l'instrumentation innovante en lui donnant une stratégie et des moyens dédiés.

La transversalité passe aussi par les données dans un cadre de science ouverte : les enjeux de celles-ci et du calcul sont nécessaires à l'excellence de nos recherches, voire à leur développement, mais aussi centrales pour les travaux de recherches aux interfaces, transverses.

Actions Inter-instituts ou inter-organismes

Sur la question du croisement de données OA avec celles d'autres disciplines comme SHS, nous devons réfléchir sur le rôle que notre communauté doit jouer. La communauté doit contribuer à définir le cadre de co-construction entre instituts, avec la MITI et s'impliquer plus fortement comme acteurs dans les groupes de travail du GdR OMER.

Il apparaît donc avant tout indispensable que les actrices et acteurs de ces communautés se rencontrent, identifient

les problématiques communes qui les animent et partagent leurs savoirs et questions respectifs sur ces problématiques. Ce préalable est indispensable pour dépasser le stade de la multidisciplinarité, la juxtaposition d'actions disciplinaires pas réellement connectées étant encore trop souvent mise en avant dans les projets afin de répondre aux exigences d'interdisciplinarité des appels d'offres. Les verrous à dépasser pour y parvenir sont la valeur et la reconnaissance qui y seront accordées pour les chercheurs, ainsi que le temps et le financement qui y seront dédiés.

Formation

Si le système éducatif a longtemps eu du mal à prendre en compte des thématiques aussi transversales que celles couvertes par le domaine «océan-atmosphère», ces dernières années ont vu les programmes scolaires significativement modifiés pour mieux intégrer les enjeux liés aux changements climatiques dès l'école primaire jusqu'au lycée. Cette meilleure intégration fait suite aux accords de Paris, après lesquels la communauté scientifique OA, en lien avec des associations et les ministères, a commencé à se mobiliser pour fournir un appui aux enseignants. Cette structuration s'appuie notamment sur l'*Office for Climate Education*, qui sous l'égide de l'UNESCO, produit des ressources pédagogiques basées sur les rapports du GIEC, propose des formations associées et structure des réseaux d'enseignants, et vient en appui aux politiques publiques éducatives en France et dans près d'une vingtaine de pays. Cet effort de communauté scientifique est cependant encore expérimental et compte tenu de l'ampleur de la tâche, il est indispensable non seulement que des relais soient trouvés mais que la communauté s'organise pour se connecter à ces relais.

De plus, fin 2022, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche annonçait «Au plus tard en 2025, tous les étudiants seront formés à la transition écologique au début de leurs études», décidant ainsi la formation de plus d'un million d'étudiants. Il va de soi que ce défi qui concerne sans exclusive les communautés qui étudient le système Terre - dont la communauté OA - nécessite que le Ministère prenne la mesure des besoins de recrutement qu'il implique mais aussi que la communauté s'organise pour massifier la transmission des connaissances qu'elle produit.

Outre ces enjeux sociétaux, la formation est également un enjeu prégnant pour le domaine océan-atmosphère tant elle détermine ses futures ressources humaines. Faire partager l'enthousiasme pour leurs sciences des personnels de nos communautés mais aussi assurer la formation de haute qualité aux approches dont nos thématiques ont besoin à un nombre d'étudiants suffisant et donc travailler à l'attractivité de l'offre de formation doivent être des priorités.

Dans le supérieur, pour les étudiants et étudiantes souhaitant se former aux thématiques OA à leur arrivée dans le supérieur, des cours «d'initiation» spécifiques sont délivrés dans le cadre des mentions de licences scientifiques, qui peuvent inclure des formations de terrain. Certaines s'appuient déjà sur les Sites Instrumentés, les moyens aéroportés et sur la Flotte Océanographique Française, plaçant nos infrastructures de recherche en responsabilité sur ces sujets-là. De rares filières sont destinées à la formation spé-

cifique de techniciens supérieurs amenés à exercer dans des filières professionnelles liées aux thématiques OA, comme par exemple au CNAM-Intechmer ou à l'École nationale de la météorologie.

Les formations universitaires plus spécifiquement OA sont mises en œuvre dans le cadre d'une vingtaine de mentions de master dans des universités réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain et à la Réunion (Figure 19). Ces formations sont pour partie soutenues voire pilotées par des OSU. Dans la nomenclature nationale «normalisée» des masters, ces formations élargissent dans une grande diversité de mentions et sont déclinées en une trentaine de parcours de deuxième année de master (M2). Les effectifs de ces parcours sont généralement compris entre 10 et 40 étudiants, formant ainsi plus de 500 étudiants par an. Des filières «Ingénieur» existent dans le domaine de la météorologie, du climat et pour certains aspects de l'océanographie. Quelques masters OA sont accessibles à des élèves d'école d'ingénieur via des accords ou des co-accréditations. Des masters sont ouverts vers l'international dans le cadre d'échanges avec des universités étrangères et pour certaines formations avec des co-diplômes entre des universités françaises et étrangères. Il est à noter que la frontière des «formations océan-atmosphère» est difficile à placer vis à vis de certaines formations de domaines connexes (e.g. écologie, ingénierie, géographie) mais également vis à vis des formations «traditionnellement» éloignées de notre domaine (e.g. sciences politiques, santé, journalisme) mais qui intègrent de plus en plus d'interventions (voire d'unités d'enseignement) sur l'environnement et le climat. Si certaines mentions de master ne sont pas confrontées à des problèmes de recrutement, le vivier d'étudiants «physiciens» est en diminution constante (et ce, depuis plus de 10 ans) et constitue une menace pour certaines spécialités du domaine OA.

Les infrastructures du domaine OA contribuent à la formation dans les licences, les masters et les cycles d'ingénieur au travers de stages de terrain (optionnels ou obligatoires), allant d'une journée jusqu'à une ou deux semaines. Ces stages de terrain mobilisent, en particulier la flotte océanographique française, les stations marines et les sites d'observation labellisés. Ces infrastructures sont également utilisées dans le cadre d'écoles d'été par les élèves de master et doctorat). Les nouvelles structures universitaires visant à mieux rapprocher l'enseignement de la recherche (Ecoles Universitaires de Recherche, Instituts d'établissement) constituent des opportunités de financement pour ces stages de terrain mais peuvent être parfois dissociées des contextes régionaux (OSU) et nationaux de l'enseignement et de la recherche.

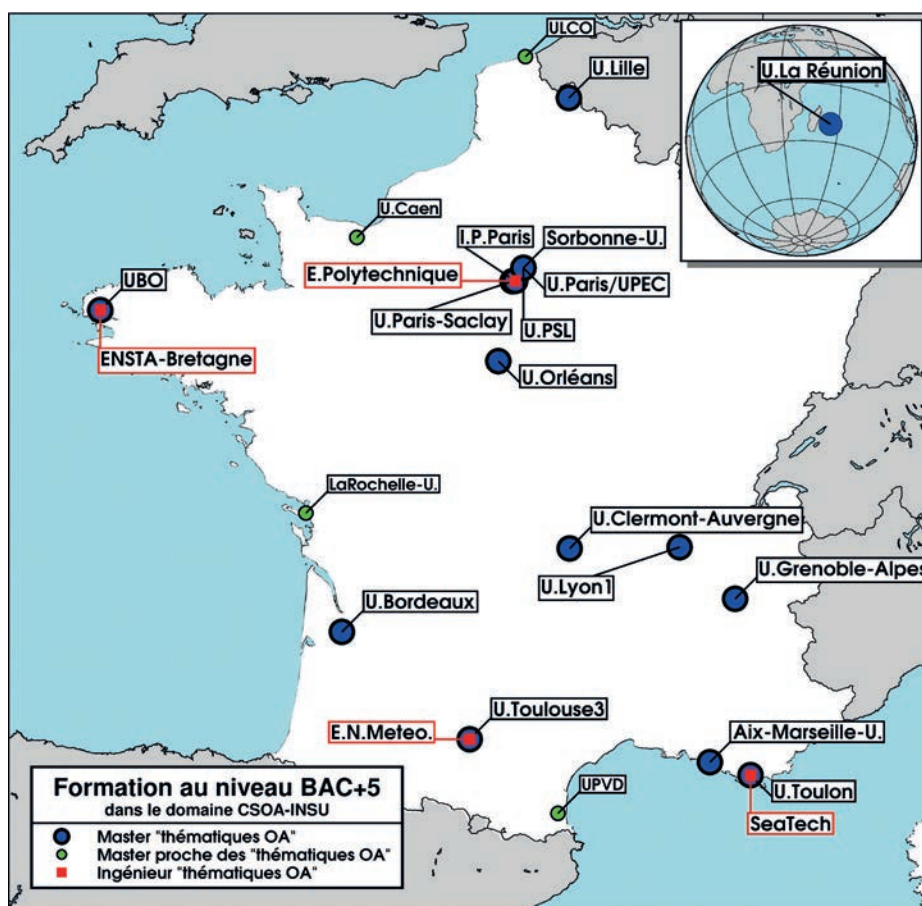


Figure 19. Répartition sur le territoire national au niveau Bac+5 des formations du domaine OA. Certaines universités peuvent porter plusieurs mentions de master.

Certains OSUs contribuent à la formation en dehors des cursus universitaires à travers des formations professionnelles (dans le cadre de plateformes techniques par exemple).

La formation par la recherche dans le domaine OA au niveau doctorat se fait dans des écoles doctorales dédiées aux sciences de l'environnement ou généralistes, avec pour mémoire environ 500 doctorants dans les laboratoires du domaine OA (voir bilan RH). Une formation à l'éthique de la recherche a été rendue obligatoire pour les étudiants et étudiantes en thèse, et les encadrants, en ligne avec les recommandations de cette prospective. Les règles de comptabilité publique intégrant les doctorants dans le plafond d'emplois de certains organismes publics peuvent constituer une menace pour le financement des travaux doctoraux.

Les IR apportent également un soutien important à divers types d'enseignement. Elles fournissent des jeux de données de références interdisciplinaires, des supports spécifiques à différentes formations depuis l'acquisition de la donnée (y compris les capteurs) jusqu'à l'exploitation des données, et permettent des apprentissages sur le terrain, très concrets, qui sont en phase avec les attendus des étudiants. Des partages d'expériences entre IR seraient bénéfiques pour renforcer ces apports.

La formation sur les thématiques OA dans l'enseignement primaire et secondaire a été significativement modifiée au cours des dernières années et la formation des professeur.e.s doit encore être soutenue à travers des ressources de qualité mises à leur disposition et des réseaux professionnels organisés. Il convient donc de **constituer un corpus pédagogique**. Les personnels des laboratoires pourraient mieux contribuer à la mise à disposition d'outils de compréhension à travers la création de ressources éducatives basées sur les résultats des recherches les plus avancées. Cependant, n'ayant pas d'expertise spécifique de la pédagogie au primaire et secondaire, la communauté scientifique doit travailler main dans la main avec les enseignants et les pédagogues.

Une deuxième recommandation concerne le **renforcement des disciplines émergentes (sciences des données) ou en tension**. Pour les formations supérieures, il est recommandé de développer les connaissances en « Sciences et données » et en particulier sur les méthodes d'apprentissage et prévision (« intelligence artificielle ») pour l'exploitation des grands jeux de données. Ceci doit s'accompagner de connaissances plus approfondies sur les propriétés physiques et biogéochimiques mesurées *in situ* et par les satellites. La formation à l'usage et au développement de codes numériques mais aussi aux notions de couplages et d'inter-

faces doit être développée dans la perspective du développement de nouveaux modèles numériques. Des formations interdisciplinaires (intégrant par exemple la bioinformatique) sont encore manquantes pour mieux appréhender la biogéochimie, la géoingénierie, etc. Les étudiants doivent pouvoir acquérir des compétences permettant de favoriser les approches transdisciplinaires visant à aborder les problèmes en s'affranchissant des catégories disciplinaires. Le développement d'une véritable « culture de l'impact » et des enjeux éthiques associés doivent être favorisés. Ces connaissances et compétences sont en partie valorisables en dehors de la recherche académique et leur prise en compte dans les formations pourraient donc augmenter les débouchés professionnels des étudiants et étudiantes et donc, *in fine*, favoriser l'attractivité des formations.

La **généralisation de la formation à la transition écologique** dans l'enseignement supérieur et la définition d'une base commune de connaissances, de compétences et de ressources doit mobiliser la communauté OA pour que l'offre pédagogique s'appuie sur l'expertise de nos laboratoires. Un renforcement du rôle (mais aussi des effectifs) de la section 37 du CNU (mais aussi des autres sections concernées) semble indispensable pour conduire cette transformation importante dans l'offre de formation.

Il faudra aussi **augmenter la visibilité de nos filières** : la nomenclature nationale des formations universitaires ne favorise pas la visibilité des formations en OA. Il est par exemple difficile pour un étudiant ou une étudiante souhaitant se former aux bases scientifiques du changement climatique d'identifier pour l'ensemble du territoire un parcours universitaire. Une action en direction du Ministère en ce qui concerne la nomenclature mais surtout une politique de communication – par exemple portée au niveau des OSU – permettant d'accroître la visibilité de nos formations doit être mise en place.

Une attention particulière devra être portée à la **formation continue** par la formation des personnels des unités en valorisant mieux leur formation et le partage des compétences via les réseaux métiers. Certaines formations spécialisées sur des nouvelles instrumentations (e.g. télé-pilotage de drones..) ou encore des méthodes d'analyses de données (e.g. « intelligence artificielle ») doivent être développés au sein des unités. La formation à l'estimation de l'impact environnemental des activités de recherche, mais aussi sur la responsabilité de l'engagement public des scientifiques est à développer et pourrait mobiliser les OSU au sein des universités.

A contrario, les personnels OA (dont certains sont déjà engagés individuellement dans des activités de médiation) peuvent contribuer à des actions de formation continue ou initiale de non scientifique (école de journalisme, collectifs, associations, entreprises...).

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange 75016 Paris
www.insu.cnrs.fr



Prospective océan-atmosphère 2023-2028