



INSU

PROSPECTIVE 2023-2028
DE LA RECHERCHE EN OCÉAN-ATMOSPHÈRE

Comprendre, prévoir
et accompagner la société
**à l'heure du changement
climatique**



Éditorial

Placé au sein du CNRS, l'Institut national des sciences de l'Univers a pour mission d'élaborer, de développer et de 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 de la trajectoire de la recherche en sciences de l'Univers.

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 en direction de divers porteurs d'enjeux : société civile, décideurs et monde économique, en lien avec nos partenaires universitaires.

Par les objets auxquels elles s'intéressent, par les enjeux sociétaux sans précédent qu'elles 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 prospectives du domaine Océan-Atmosphère sont des moments essentiels de cet alignement de nos communautés sur ses objets de recherches, mais aussi sur ses responsabilités sociétales.

Complémentaire au rapport intégral, ce document prétend en faire l'exégèse à destination des grands acteurs de la société : entrepreneurs, décideurs, élus, collectivités... Il porte en lui les engagements que la communauté scientifique a pris pour elle-même, mais aussi et surtout pour être plus utile à toute la société.

Nicolas Arnaud
Directeur de l'INSU

Rédaction en chef :

Jean-François Doussin (Directeur adjoint de l'INSU)

Conception : Agent Majeur

Directeur de la publication :

Antoine Petit (Président-directeur général du CNRS)

Directeur de la rédaction :

Nicolas Arnaud (Directeur de l'INSU)

Impression : CNRS DR1 IFSEM Secteur de l'imprimé

Photo de couverture : Christophe Cassou

Février 2024 

01	LA SCIENCE DE L'OCÉAN ET DE L'ATMOSPHÈRE	4
	Le rapport Prospective Océan-Atmosphère 2023 La recherche scientifique face au défi climatique	
02	NOS CHIFFRES CLÉS	6
03	LE BILAN DES PRÉCÉDENTES PROSPECTIVES OCÉAN-ATMOSPHÈRE	7
	Un socle fertile d'avancées scientifiques Modéliser les changements climatiques	
04	LES DÉFIS SCIENTIFIQUES OCÉAN-ATMOSPHÈRE — COMPRENDRE ET PRÉFIGURER LE SYSTÈME CLIMATIQUE	8
	Défi 1. Variabilité, tendances et points de bascule du système climatique Défi 2. Événements extrêmes : caractériser, comprendre et anticiper Défi 3. Convection atmosphérique et changements climatiques Défi 4. Diversité du vivant et biogéochimie Défi 5. Anthropisation des milieux et pollutions Défi 6. Couplages et interactions d'échelles	
05	LES AIRES PRIORITAIRES	13
	Le milieu urbain Les aires tropicales et intertropicales Les régions polaires Le continuum continent-océan	
06	NOS ENGAGEMENTS : GUIDER L'ACTION, ÉVALUER LES SOLUTIONS ET ÊTRE EXEMPLAIRE	13
	Éclairer les politiques publiques Les expertises OA au service de la communauté Les services climatiques pour aider à la décision L'innovation pour valoriser l'action	
07	LES 6 IMPÉRATIFS POUR LA MISE EN ŒUVRE DES PROJETS	17
08	NOS PRÉCONISATIONS POUR DÉCIDEURS	18



Premier essai en mer du prototype du profileur
VVP (Vertical Velocity Profiler) destiné à mesurer
les courants marins verticaux.
© Dorian GUILLEMAIN / OSU Pythéas / CNRS Images

La science de l'Océan et de l'Atmosphère

La recherche fondamentale sur l'Océan et l'Atmosphère apporte un éclairage irremplaçable, en s'inscrivant dans la durée. Cette activité scientifique, qui mobilise des équipes interdisciplinaires et d'importants moyens, est nécessaire à la compréhension des changements climatiques et à celle de l'anthropisation, c'est-à-dire de l'impact des activités humaines sur l'environnement.

La recherche fondamentale sur l'Océan et l'Atmosphère **permet aux Régions et aux États, comme à toute société humaine, d'anticiper et de prendre les meilleures décisions** face aux perturbations qui sont déjà en cours.

La communauté Océan-Atmosphère **participe activement aux travaux du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC)** et à la rédaction de ses rapports. Au-delà, ses recherches per-

mettent de mieux comprendre les processus en cours, afin d'avoir toutes les clés pour agir.

En France, ce travail d'envergure est effectué dans le domaine Océan-Atmosphère (OA) grâce à la **collaboration d'un ensemble d'acteurs** institutionnels. Parmi eux, on compte notamment le CNRS, le CNES, l'Ifremer, le CEA, Météo France, l'Ademe, l'IRD et plus d'une quinzaine d'universités. Les activités de cette communauté Océan-Atmosphère sont coor-

données par l'Institut national des sciences de l'Univers (INSU), l'un des 10 instituts thématiques du CNRS.

Le rapport Prospective Océan-Atmosphère 2023

Tous les cinq ans, la communauté scientifique Océan-Atmosphère mène une réflexion prospective permettant **d'établir un état de la science et des moyens, et de définir les enjeux et les priorités pour le futur.**

L'objectif est de :

- **renforcer notre connaissance fondamentale** de l'océan et de l'atmosphère, étudier leurs interactions, dans toute leur complexité ;
- **adopter une vision globale** des trois grandes enveloppes du système Terre (l'océan, l'atmosphère et la cryosphère - les glaces continentales) et prendre en compte l'impact du monde vivant ;
- **améliorer les méthodes** d'observation, de mesure, de traitement des données et de modélisation ;
- **mieux identifier et caractériser l'impact** des sociétés humaines sur l'environnement ;
- **mettre en place les moyens** pour répondre aux défis de la connaissance par une programmation interdisciplinaire et des moyens mutualisés, ainsi que des programmes nationaux en soutien à cette programmation.

Le rapport Prospective Océan- Atmosphère 2023



Pour élaborer la prospective nationale Océan-Atmosphère 2023-2028, la Commission scientifique Océan-Atmosphère (CSOA) a fait la synthèse des conclusions de 16 groupes de travail. Résultant d'un travail de réflexion et d'anticipation de 18 mois et rédigé par plus de 150 contributeurs, le rapport Prospective Océan-Atmosphère 2023 fait le bilan des avancées et établit des recommandations pour les 5 années à venir. Le présent document en constitue un résumé.



La communauté Océan-Atmosphère en France



2 600
publications par an
dans des journaux
scientifiques de rang A



700
doctorants



1^{er}
contributeur mondial
du 6^e rapport du GIEC
en connaissances des bases
physiques du climat



+ de **2 000**
chercheurs, enseignants-
chercheurs et personnels
d'appui permanents



11
observatoires
des sciences
de l'Univers



23
unités de
recherche

Le bilan des précédentes prospectives Océan-Atmosphère

Dans le domaine Océan- Atmosphère, le développement de synergies et de moyens mutualisés ainsi que les progrès de la modélisation et de l'expérimentation ont permis une meilleure compréhension des phénomènes atmosphériques et océaniques, à petite échelle comme au niveau planétaire.



Avancée des scientifiques dans la banquise morcelée du détroit de Jones au Canada, à bord du canoé des glaces, équipé d'un instrument de mesure d'épaisseur de glace par induction. © Claudie MAREC/IUEM/Takuvik/CNRS Images.

Un socle fertile d'avancées scientifiques

Grâce à un socle d'avancées scientifiques, les chercheurs perçoivent mieux les interactions (par exemple entre les ondes de marées et les tourbillons océaniques) et les rétroactions, telles que celles qu'exercent certaines formations nuageuses sur le réchauffement atmosphérique. Ainsi, en quantifiant tous ces effets parfois contraires, il devient possible d'affiner encore les scénarios du changement climatique à une échelle régionale, voire locale.

En outre, **l'étude des climats du passé nourrit de précieux modèles** en ce qui concerne l'amplitude et la vitesse des changements, et leurs impacts sur l'environnement. C'est **l'ensemble atmosphère-océan-cryosphère** qui

est pris en compte dans l'étude des interactions et des rétroactions, dans le but de mieux appréhender le système climatique.

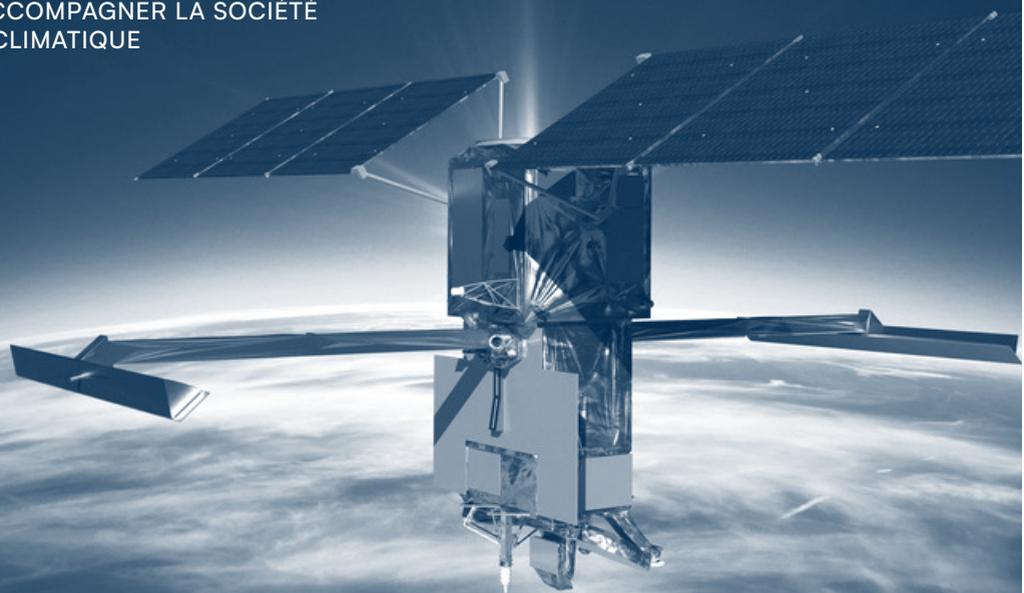
Modéliser les changements climatiques

Nos modèles de climat intègrent l'océan, l'atmosphère et la cryosphère. Tout en affinant toujours leurs échelles et en intégrant les données de l'observation, **ils se tournent aujourd'hui vers la zone que nous habitons**. Elle comprend les écosystèmes, la zone côtière et la basse atmosphère, mais dépend aussi de l'ensemble des perturbations globales. Les changements qui s'y opèrent sont étudiés et modélisés, notamment les émissions humaines de polluants, ainsi que **l'évolution de la qualité de l'air en ville et**

celle du climat urbain, de l'échelle régionale jusqu'à celle d'une rue.

Deux études régionales intégrées ont été ainsi menées, le chantier méditerranéen d'observation et de modélisation Mistrals (étude du changement climatique et les interactions entre climat, écosystèmes et sociétés du monde méditerranéen, 2010-2020) et le chantier arctique français, de même qu'une participation aux recherches climatiques en Antarctique. Enfin, **l'étude de la contribution des communautés d'organismes vivants** (telles que le plancton marin) aux grands cycles des éléments chimiques, bénéficie de technologies nouvelles et de collaborations interdisciplinaires.

Illustration du satellite Swot qui suit depuis janvier 2023 les eaux à la surface de la Terre (océaniques et continentales) avec une résolution inégalée à ce jour.
© CNES/Mira productions



LES DÉFIS SCIENTIFIQUES OCÉAN-ATMOSPHÈRE

Comprendre et préfigurer le système climatique

L'anthropisation est une réalité sensible en ce qui concerne le climat planétaire. Pourtant, des aspects majeurs de la « machine » climatique restent méconnus. Il demeure des incertitudes quant aux changements et à leurs effets. La prospective OA prend en compte ces enjeux, sous la forme de six défis scientifiques au sein de zones prioritaires.

DÉFI 1

Variabilité, tendances et points de bascule du système climatique

La recherche de « points de bascule » du système climatique, c'est-à-dire d'événements provoquant des changements importants, voire irréversibles, va nécessiter l'exploration systématique de la sensibilité des modèles, de même qu'une utilisation accrue des observations disponibles depuis près de 50 ans.

La modélisation des changements climatiques nécessite quant à elle des

améliorations méthodologiques, ainsi qu'un important enrichissement en données d'observation. C'est particulièrement le cas pour **l'étude des changements provoqués par les gaz à effet de serre et les aérosols**, à un niveau global ou régional, et pour celle de la **variabilité interne de l'océan et de sa dynamique à grande échelle**.

Pour répondre à ces besoins, deux facteurs concourent à une connaissance plus détaillée des phénomènes atmosphériques et océaniques : la comparaison internationale des modèles climatiques et le fait que nous sommes désormais en possession de **longues séries de données de mesures prises en continu**.

Pour la **compréhension de la turbulence océanique**, il est recommandé que les prochaines données satellites à haute résolution soient exploitées en synergie avec les observations et campagnes *in situ*.



La modélisation des changements climatiques nécessite des améliorations méthodologiques, ainsi qu'un important enrichissement en données d'observation. ”

“
L'étude
de la convection
atmosphérique
au-dessus de
l'Atlantique tropical
s'affiche comme
une priorité.”

Incendie © Laura Reed/Pexels

DÉFI 2

Événements extrêmes

La fréquence des vagues de chaleur et l'intensité des précipitations extrêmes, mais aussi d'autres phénomènes (cyclones, submersions côtières, libération de poches sous-glaciaires, mégafeux...), sont susceptibles d'augmenter avec le changement climatique. **L'anticipation de ces phénomènes est un enjeu majeur pour les sociétés humaines.**

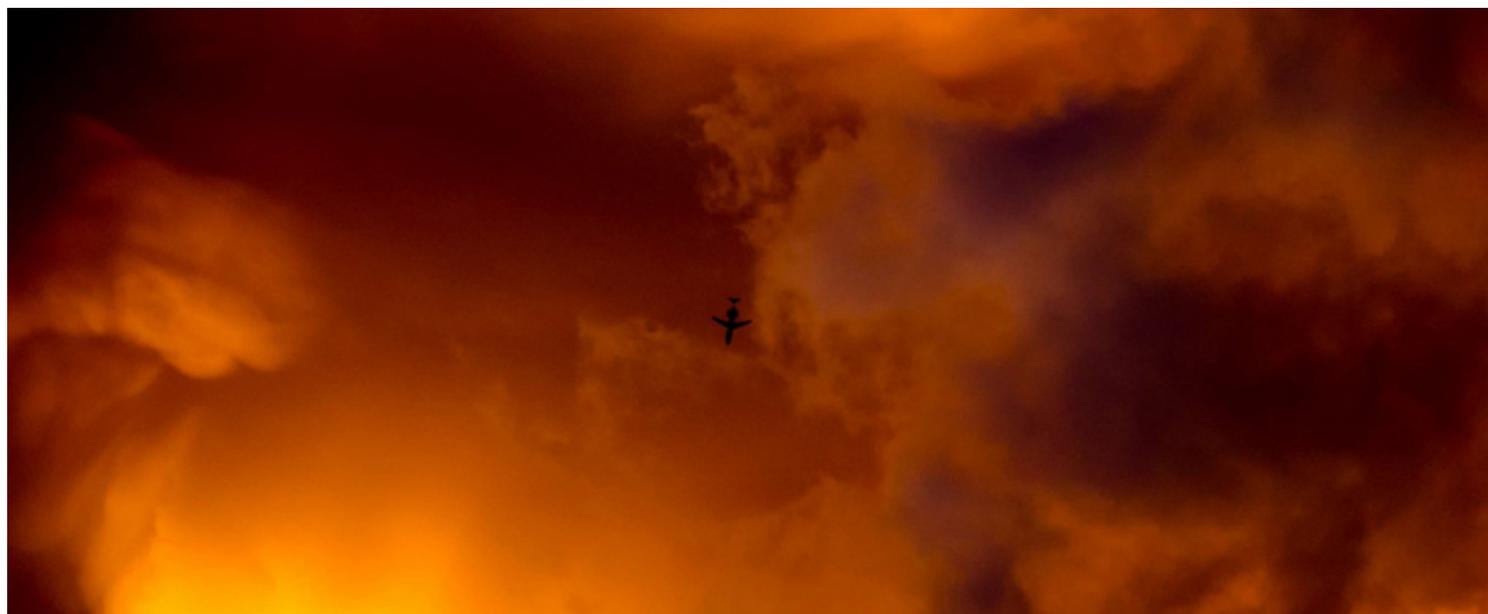
Les chercheurs de la communauté OA s'efforcent de mieux comprendre quelles influences s'exercent sur ces événements extrêmes. Ainsi, la prévision d'événements tels que la foudre et les cyclones tropicaux nécessite de progresser dans la modélisation des phénomènes convectifs de l'atmosphère qui les provoquent (voir ci-après défi 3). Là encore, des observations de longue durée, **la mise en œuvre d'une nouvelle génération de satellites à haute résolution et l'utilisation de capteurs *in situ* innovants** seront déterminantes. Quant aux vagues de chaleur marine et aux épisodes de désoxygénation, leur compréhension et leur anticipation bénéficieront aussi de progrès méthodologiques et matériels.

DÉFI 3

Convection atmosphérique et changements climatiques

Les mouvements verticaux de l'air, sous l'effet des différences de température, provoquent la convection atmosphérique, un phénomène universel qui joue un rôle dans la variabilité du climat. Le renouveau des méthodes d'observation à des échelles spatiales très fines, et les progrès de la modélisation sont, ici encore, déterminants pour **mieux connaître l'organisation dans l'espace de la convection**, ses mécanismes, sa contribution à la circulation atmosphérique (vents), son influence sur les événements extrêmes et l'impact que les changements climatiques ont sur elle.

Un tel renouveau nécessite l'augmentation des moyens humains de la communauté de chercheurs Océan-Atmosphère (avec l'apport d'expertises actuellement manquantes), ainsi que la conduite de grandes campagnes, nationales ou internationales. Dans cette perspective, l'étude de la convection au-dessus de l'Atlantique tropical s'affiche comme une priorité.



DÉFI 4

Diversité du vivant et biogéochimie

Les êtres vivants et, parmi eux, les micro-organismes (bactéries, algues et champignons unicellulaires) jouent un rôle important dans les cycles naturels d'éléments chimiques comme le carbone. On parle d'ailleurs de « cycles biogéochimiques » pour souligner la participation d'organismes biologiques à ces cycles géochimiques.

Dans l'océan, le rôle de la « pompe microbienne à carbone » est l'un de ceux qu'il importe de mieux connaître pour ses implications climatiques. C'est un **phénomène de séquestration du CO₂ atmosphérique**, d'abord dissout dans les eaux de surface, puis capté par les algues et enfin transformé lors de la sédimentation après leur mort, notamment sous la forme d'agrégats (neige marine).

Au-delà de 200 mètres sous la surface de l'océan, **la zone la moins explorée de notre planète joue**

un rôle essentiel dans la régulation du climat, en piégeant le carbone et en influençant les bilans de chaleur à l'échelle planétaire. Si les écosystèmes profonds sont encore largement méconnus, on sait cependant que leurs spécificités sont très grandes, qu'ils sont un élément important de la biodiversité et qu'ils sont extrêmement fragiles. Or, **les grands fonds marins abritent des ressources** qui attirent les convoitises industrielles. Le défi actuel des recherches de la communauté OA est de **développer l'observation et l'instrumentation** (par exemple la capacité à prélever des échantillons in situ), tout en contrôlant l'impact de telles opérations, car les écosystèmes profonds sont fragiles.

Enfin, des micro-organismes de l'océan encore méconnus, aux caractéristiques à la fois végétales et animales, ou appartenant au groupe des champignons ou encore à celui des virus, jouent un rôle dans les cycles géochimiques. De même, dans l'atmosphère, **des micro-organismes en suspension dans l'air pourraient influencer sur la formation des nuages.**

Il y a donc un ensemble de recherches à entreprendre aux interfaces continent/atmosphère/océan pour **appréhender la diversité des relations entre le vivant et le climat** et pour explorer les facteurs encore mal connus qui ont un impact sur l'activité biologique (comme les sources hydrothermales sous-marines).

Le phytoplancton, étape essentielle de la chaîne alimentaire océanique, est aussi un facteur déterminant du stockage du carbone par les océans.



Protistes et larves planctoniques. Ce plancton a été récolté au cours de l'expédition Tara. Le 5 septembre 2009 le bateau Tara est parti de Lorient pour une expédition de 3 ans sur tous les océans du monde, afin d'étudier la vie microscopique des océans. © Christian SARDET / Tara Océans / Plankton Chronicles / CNRS Images



Anthropisation du domaine côtier. L'océan côtier, comme tous les compartiments du système Terre, connaît une anthropisation sans précédent qui pose des problèmes d'habitabilité et de biodiversité. © Henri Wortham

DÉFI 5

Anthropisation des milieux et pollutions

La transformation par l'Homme des environnements atmosphériques et océaniques a **des impacts aigus et parfois durables, qui mettent en péril les écosystèmes**, voire leur habitabilité par l'espèce humaine. Qu'il s'agisse de la qualité de l'air ou de la pollution par les microplastiques, leur étude exige une approche pluridisciplinaire, nécessairement en lien avec la société. En effet, les perturbations sont à la fois écologiques,

économiques, sociales et sanitaires. Elles ne peuvent être combattues qu'à la faveur d'un transfert efficace des connaissances et des expertises (voir page suivante, nos engagements).

Dans le domaine de la qualité de l'air, les recherches doivent notamment porter sur l'évolution à long terme des polluants atmosphériques, sur les processus d'oxydation des composés organiques volatils (COV), ainsi que sur l'influence des conditions météorologiques. La communauté OA a la capacité de **lancer d'importantes campagnes de mesures et d'analyse des observations satellitaires**. Il importe notamment de bien com-

prendre certains aspects de la chimie des polluants et de distinguer leurs origines anthropiques et naturelles (feux, volcans par exemple). Cela exige de **multiplier les collaborations interdisciplinaires, notamment avec des chimistes**, et de poursuivre la participation à des programmes internationaux.

L'étude des microplastiques, dans l'ensemble des compartiments du système Terre, doit aussi faire l'objet de recherches d'ampleur permettant d'aboutir à des quantifications, notamment pour ce qui concerne les enveloppes fluides (océans, fleuves, atmosphère).

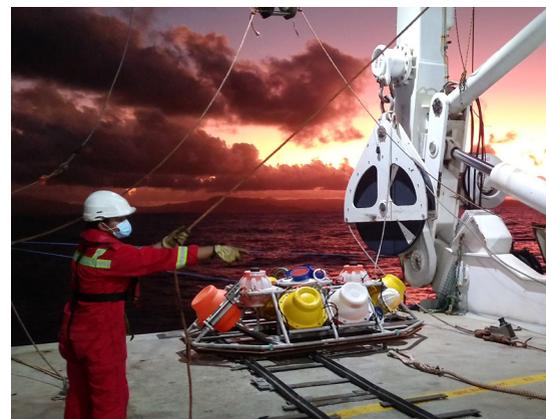
DÉFI 6

Couplages et interactions d'échelles

L'expertise française est déjà riche en ce qui concerne les échanges d'énergie et de matières aux interfaces océan-atmosphère, continents-atmosphère ou encore océan-cryosphère-atmosphère. Du fait de ces échanges, on dit que ces compartiments sont en couplage. Pour la communauté OA, il est prioritaire de **mieux comprendre et modéliser les couplages, leurs**

interactions à différentes échelles spatiales et temporelles, et leur évolution dans un contexte climatique changeant.

Pour cela, il est nécessaire de multiplier les observations conjointes dans ces milieux et d'établir une hiérarchie de modèles numériques, à différents niveaux de résolution spatiale. Plusieurs campagnes de recherche, récentes ou à venir, apporteront de nouvelles observations de ces couplages. **Les besoins en développement concernent notamment l'instrumentation embarquée** et la mise à disposition de simulations numériques couplées.



Déploiement (juillet 2022) d'un châssis instrumenté depuis le Marion Dufresne 2 dans la zone du volcan sous-marin de Mayotte pour mesurer les courants marins, à haute fréquence. © Jérôme Paillet / Lops / CNRS Images

Les aires prioritaires

Pour répondre à ces six défis scientifiques, la communauté se focalise sur quatre aires prioritaires. Elles ont été choisies en fonction de leur intérêt au regard des axes de recherche, mais aussi de leurs enjeux sociétaux, de leur vulnérabilité aux changements climatiques et de l'implantation de la communauté Océan-Atmosphère.



Lâcher d'un ballon-sonde dans l'atmosphère pour un radiosondage sur les bords de Seine, à Paris.
© Cyril FRESILLON/CNRS Images

Le milieu urbain

La **compréhension de l'évolution des microclimats urbains** sous l'effet des changements climatiques est un enjeu essentiel. Réciproquement, l'impact des villes doit être mieux pris en compte dans la modélisation du système climatique.

Les axes de recherche s'orientent sur la quantification et la prédiction des risques météorologiques, et sur le couplage entre changement climatique et microclimat urbain. Ils concernent également la vulnérabilité de la ville vis-à-vis des événements extrêmes, mais aussi la qualité de l'air, compte tenu des pratiques qui vont nécessairement évoluer. Une approche interdisciplinaire est requise pour évaluer l'impact de la ville sur le climat et l'environnement régional et pour caractériser la diversité des composés chimiques de l'atmosphère urbaine (gaz et particules). Le développement de modélisations intégrées pour la ville, appuyées par l'intelligence artificielle, répond à la volonté de préciser les risques pour les habitants.

Pour évaluer l'impact des vagues de chaleur régionales, mais aussi les effets de la végétalisation de l'espace urbain et ceux de la décarbonation des transports et de l'indus-

trie, il est nécessaire de coordonner le travail de différents organismes et intervenants (chimistes, physiciens, médecins, sociologues, urbanistes, juristes). **La ville est le terrain idéal de l'interdisciplinarité et d'une meilleure intégration des sciences participatives**, notamment par le recueil d'observations de participants qui ne sont pas des scientifiques professionnels. La communauté Océan-Atmosphère s'inscrit ainsi résolument dans le chantier urbain lancé par l'INSU, qui concerne également les communautés de l'étude des surfaces et interfaces continentales et de la Terre solide.



Orthophotographie de la plage de l'Hermitage (La Réunion, Saint-Gilles les Bains, 97460). © 2005 Mai-Linh Doan

Les aires tropicales et intertropicales

Indispensables, les observations à long terme s'avèrent pourtant **nettement plus difficiles en zone tropicale et intertropicale que dans les régions tempérées**. Avec un objectif d'amélioration des modèles climatiques régionaux, les recherches s'orientent sur la prévision des cyclones tropicaux, la caractérisation de la variabilité climatique à long terme, ainsi que l'étude de la convection profonde dans l'atmosphère et de la circulation des polluants.

Il s'agit de travailler dans un contexte d'évolution rapide et de concevoir des stratégies d'adaptation. Certains dispositifs d'observation à long terme de la communauté



Avec sa faible profondeur, le continuum continent-océan, qui reçoit directement les effluents du continent, est particulièrement sensible à l'anthropisation. »

Océan-Atmosphère sont déjà implantés dans la zone tropicale depuis plusieurs années. En outre, la **coconstruction avec les organismes de recherche locaux** bénéficiera aux travaux entrepris, tout en favorisant le partage de connaissances, l'adhésion et l'implication des populations.



L'Astrolabe I, ses passagers et un manchot empereur en bordure de la banquise, Antarctique. © Yan ROPERT-COUDERT / CEBC / IPEV / WWF-Royaume-Uni / CNRS Images



Mangrove du Moule en Guadeloupe. © Cyril FRESILLON / PEPSEA / CNRS Images

Les régions polaires

Archives naturelles de la composition atmosphérique, qui est enregistrée dans leurs glaces, les régions polaires sont également des zones clés du système climatique. La pollution venant des latitudes moyennes les atteint et elles se montrent particulièrement vulnérables au réchauffement planétaire. **Leur couvert neigeux diminue, leurs sols dégèlent et leurs calottes polaires se réduisent**, de même que les superficies de banquise.

S'appuyant sur les réalisations, les compétences et les infrastructures de la communauté scientifique nationale pilotée par l'INSU, l'État français a proposé, en avril 2022, **une stratégie polaire française**. Sur cette base, la prospective Océan-Atmosphère a inclus les pôles dans ses axes prioritaires de déploiement scientifique. Pour prévoir l'évolution des régions polaires, il faut s'appuyer sur leur paléoclimatologie, modéliser les interactions avec l'atmosphère et l'océan et mieux comprendre les effets en retour de l'enneigement, en complétant les mesures physiques par des études chimiques.

La recherche Océan-Atmosphère française est **bien implantée en Arctique et en Antarctique**, où se poursuivent des observations à long terme et des expérimentations innovantes. Il est nécessaire de la renforcer par des expertises complémentaires et de mieux l'équiper (en instruments et en moyens de modélisation). Elle a aussi pour objectif de poursuivre et de développer ses collaborations internationales, notamment pour anticiper certains impacts globaux, tels que l'élévation du niveau des mers.

Le continuum continent-océan

Le continuum continent-océan désigne la zone allant du littoral au talus continental (la pente sous-marine qui sépare la zone côtière des grands fonds). Avec sa faible profondeur, **cet océan côtier** recevant directement les effluents du continent **est particulièrement sensible à l'anthropisation**. La zone côtière est aussi celle où vit la majeure partie de la population. Les enjeux scientifiques et sociaux y sont donc multiples : élévation du niveau des mers, acidification, risques d'érosion et de submersion, mais aussi capacité de cette zone hétérogène à « s'épurer » et à piéger le carbone.

Il est nécessaire de mieux prévoir les variations régionales du niveau marin, les échanges d'eau et de matières (en particulier au niveau des estuaires), ainsi que l'effet des espèces « ingénieuses » (herbiers, mangroves, récifs de corail, huîtres, etc.). Étant donné les enjeux climatiques et sociaux de l'océan côtier, il faut **associer aux physiciens des biogéochimistes, des mathématiciens, des écologues et des biologistes, mais aussi des chercheurs en sciences humaines et sociales**.

NOS ENGAGEMENTS

Guider l'action, évaluer les solutions et être exemplaire

Des solutions nouvelles sont à inventer pour limiter les changements et leurs effets, tout en subvenant aux besoins énergétiques et alimentaires essentiels, et en préservant nos ressources naturelles. La fonction première des chercheurs de la communauté Océan-Atmosphère reste la production de connaissances répondant aux exigences d'éthique et d'excellence. De ce fait, ils sont détenteurs d'une part très importante des savoirs indispensables à la compréhension du changement climatique et à l'adaptation des sociétés. Assumer le rôle de service public de recherche signifie aussi mettre ces savoirs à disposition de toute la société, pour relever les immenses défis du changement climatique et de l'anthropisation.

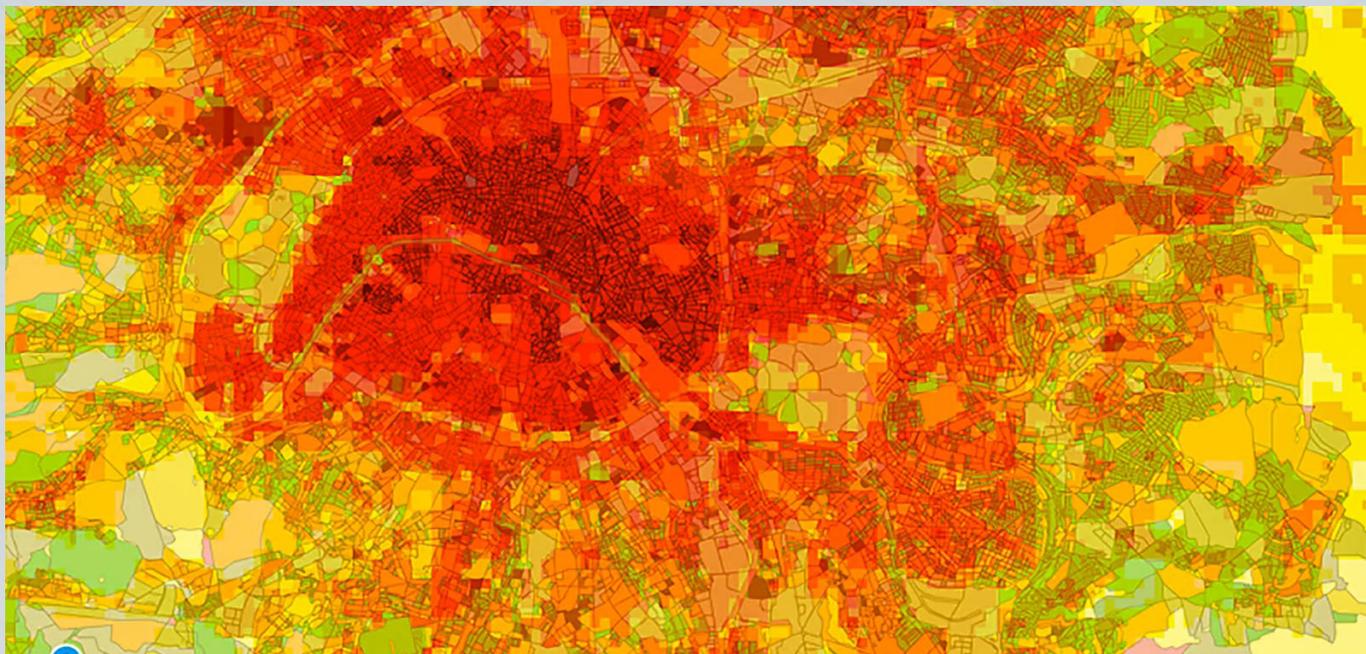
Accompagner les politiques publiques

Déclinées aux échelles pertinentes, les travaux de la communauté OA peuvent **nourrir les démarches d'adaptation** — telles que la transition énergétique, les politiques d'aménagement ou l'émergence de technologies nouvelles — et permettre de **mieux quantifier les effets des actions d'atténuation ou anticiper les risques**, pour limiter les conséquences des changements climatiques.

Donner du sens pour éclairer la société

Les crises récentes ont révélé à quel point notre société a besoin de la science et de ses éclairages, pour comprendre les enjeux et planifier les actions. **Le changement climatique et l'anthropisation des milieux représentent peut-être l'un des plus grands défis de l'histoire de l'humanité.** L'habitabilité de régions entières risque d'être remise en question. Les besoins d'adaptation et de mitigation vont demander des efforts considérables à l'ensemble des populations.

La recherche en sciences de l'atmosphère, de l'océan et du climat fournit un savoir pertinent pour **comprendre les mécanismes en jeu et leurs conséquences.** En tant que service public de production de connaissances, elle a le devoir moral et sociétal de transmettre ce savoir, par la médiation et la vulgarisation. Il devient aujourd'hui nécessaire d'accompagner toute la société, pour limiter les incompréhensions, les frustrations et les peurs irrationnelles.



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

Mettre les expertises OA au service de la collectivité

La communauté OA apporte des réponses essentielles pour les grandes transitions :

- Qualifier et quantifier les risques climatiques pour **favoriser l'adaptation des « socio-écosystèmes »**.
- Reconnaître les démarches vertueuses et identifier les pratiques délétères.
- Proposer des trajectoires, de l'échelle globale à celle du territoire, en fonction de scénarios mis en débat.
- **Accompagner la capture et la séquestration du CO₂** et cartographier les émissions de gaz à effet de serre (usages et fuites).
- Évaluer et prévoir les besoins en énergie et contribuer à l'optimisation de la capacité de production, pour de nouveaux projets comme pour la gestion des réseaux énergétiques.

Les études à long terme sont effectuées par les équipes pluridisciplinaires de la communauté OA, en s'appuyant sur leurs **services nationaux d'observation** intégrés dans les réseaux internationaux, leurs sites d'expérimentation, leurs instruments nationaux et leurs codes communautaires, dans des conditions rigoureuses de mesure et de modélisation.

L'approche interdisciplinaire est par ailleurs nécessaire pour traiter les problèmes de transition écologique et énergétique dans toute leur complexité. Ainsi, le centre interdisciplinaire Energy4Climate (E4C) et l'institut de convergence CLAND sont coordonnés par des laboratoires OA. Ils mettent en place des actions qui sont destinées à s'étendre nationalement, dans une approche de complémentarité.

Produire des services climatiques pour éclairer les décisions

Lancés il y a 10 ans avec le portail de données DRIAS (CNRS—Cerfacs—Météo France), les services climatiques constituent **une aide à la décision pour les organisations et les particuliers**.

Jusqu'à présent, DRIAS mettait à disposition les scénarios climatiques régionalisés. Aujourd'hui, le Programme de recherche (PEPR) TRACCS (TRAnsformer la modélisation du Climat pour les services ClimatiqueS) a pour objectif d'améliorer les services climatiques grâce à une modélisation permettant d'affronter les défis actuels et de répondre aux attentes sociétales. Cela passe par la **production de grands ensembles de projections et le développement de méthodes statistiques avancées et de l'intelligence artificielle**.

Demain, notamment grâce à TRACCS (pour la technologie) et en s'appuyant sur le réseau des observatoires en sciences de l'Univers (pour la collecte de la demande à l'échelle locale), la communauté OA s'engagera résolument dans la **production de services climatiques innovants**. Ils répondront aux besoins exprimés par la société (décideurs publics, entreprises, associations...) et seront à la hauteur des moyens qui leur seront attribués.

Mobiliser l'innovation

La recherche scientifique en OA est source d'innovations conceptuelles et technologiques qu'il convient de mobiliser par le transfert aux acteurs socioéconomiques pour aider à la mutation vers une économie sobre en carbone, tout en participant à la création d'emplois. En outre, face à l'urgence climatique, la collaboration entre le monde socioéconomique et la communauté Océan-Atmosphère doit être renforcée.

Voici quelques exemples de valorisations issues d'innovations dans le domaine OA :

- Développement de capteurs et d'algorithmique satellitaire venant soutenir la R&D du secteur aérospatial national.
- Création de start-ups avec des applications opérationnelles (par exemple GRASP-SAS, du laboratoire d'optique atmosphérique, qui fournit des services de télédétection, ou Amphitrite, du laboratoire de météorologie dynamique, pour caractériser et prévoir les courants à la surface des océans) et de laboratoires communs avec le privé tels que AGORA-LAB (CIMEL-CNRS-U. Lille).
- Développement de services climatiques (par ex. TRACCS pour la modélisation du climat).
- Développement de capteurs environnementaux innovants par la division technique de l'INSU.

Réformer nos pratiques en allant vers plus de sobriété

De grands efforts d'investigation, de calcul, d'analyse et de stockage de données restent nécessaires pour mener à bien ces chantiers. Malgré l'urgence, la communauté Océan-Atmosphère ne s'exonère pas des efforts qui s'imposent à tous : **l'importance d'une recherche sobre s'affirme comme l'une des grandes résolutions de cette prospective.**

La recherche Océan-Atmosphère a pour cela des atouts structurels, avec la mutualisation des énergies et des moyens. Cette mutualisation est depuis longtemps synonyme d'efficacité accrue et de rationalisation des efforts financiers (par exemple, pour l'utilisation des avions et navires de recherche). Elle favorise la nécessaire interdisciplinarité des équipes et sera dans l'avenir un avantage pour le déploiement sobre de nos moyens et pour construire collectivement les stratégies de recherche et les technologies qui nous conduiront à réduire notre empreinte environnementale.

Rester garant de l'éthique et de la rigueur scientifiques

Les défis qui sont lancés à notre société nécessitent que les résultats de nos observations et les enseignements de nos travaux soient portés dans le débat public. Au cours de ce processus, les risques de mal-interprétation, de dérives ou d'approximations délétères ne sont pas rares. La communauté Océan-Atmosphère s'engage à ce que la multiplication de ses interventions s'accompagne d'une **vigilance accrue à la préservation de sa rigueur scientifique**. Cet engagement s'inscrit dans le cadre des résolutions du comité d'éthique du CNRS sur l'engagement, la communication en temps de crise et le conflit d'intérêts.

“ Les défis qui sont lancés à notre société nécessitent que les résultats de nos observations et les enseignements de nos travaux soient portés dans le débat public. ”

6 impératifs pour la mise en œuvre des projets



La concrétisation de projets d'intérêt majeur, sur le changement climatique et l'anthropisation, exige le **développement d'une instrumentation innovante**. Des progrès notables s'observent dans l'automatisation des appareils et du traitement des données, et dans la précision des mesures. L'objectif est également d'augmenter les performances et la robustesse des instruments et capteurs déployés dans des environnements difficiles ou extrêmes, et de faciliter la transmission des données à distance.



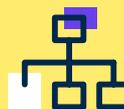
La mise en œuvre des priorités de cette prospective, mais aussi la préservation de la place de la France dans l'effort mondial de recherche sur le changement climatique, imposent que nous conservions les moyens lourds de recherche. Ils sont indispensables à l'exploration de territoires étendus. C'est en particulier le cas de la **jouvence de la flotte aéroportée** de l'infrastructure de recherche IN AIR (avions, ballons et drones), des moyens à la mer hauturier et côtier de la flotte océanographique française et de la station polaire Concordia.



Le **développement de la modélisation numérique** concerne des niveaux de détails de plus en plus fins, ainsi que les couplages entre les grandes composantes du système climatique. **L'utilisation conjointe de supercalculateurs et de l'intelligence artificielle** permettra de modéliser des savoirs multidisciplinaires et d'assimiler les données hétérogènes du système climatique. L'objectif est d'augmenter la résolution spatiale et d'explorer systématiquement les incertitudes et les sensibilités des différents modèles.



L'ouverture totale et exhaustive des données produites par nos services d'observation, nos campagnes, nos expériences de laboratoire et nos simulations, est plus que jamais essentielle à la production de nouveaux savoirs. L'établissement de l'infrastructure de recherche DataTerra est récent, et son ouverture totale permettra le **partage des données au-delà de la communauté scientifique, vers les structures opérationnelles**, les entreprises, les décideurs locaux et nationaux. Cette ouverture, si elle bénéficie du support indispensable aux laboratoires et à l'infrastructure de recherche DataTerra, sera aussi un pilier de la sobriété de nos recherches.



Une **nouvelle organisation des recherches** doit être déterminée par une déclinaison territoriale, elle-même fondée sur le réseau des Observatoires en sciences de l'Univers (OSU), et une déclinaison thématique et opérationnelle, à travers les infrastructures de recherche. Éclairée par les prospectives quinquennales, la trajectoire de la communauté est mise en œuvre par les programmes nationaux (LEFE : Les enveloppes fluides et l'environnement ; PNTS : Programme national de télédétection spatiale) et les grands programmes de l'État (PPR, PEPR...). Ces projets de grande envergure sont facteurs d'avancées scientifiques. Leurs ressources doivent être renforcées.



Dans les partenariats avec le privé, mais aussi face aux demandes d'expertise et d'engagement public de la communauté OA, **une réflexion éthique se développe**. Il s'agit d'une part de ne jamais associer la recherche scientifique à des activités commerciales aux effets potentiellement néfastes et, d'autre part, de faire preuve d'une grande rigueur scientifique dans le débat public, sans s'écarter de son champ d'expertise. Il importe notamment de **formuler avec prudence toute promesse ou tout espoir d'avancées**.

Nos préconisations pour décideurs

La communauté scientifique Océan-Atmosphère est pleinement mobilisée pour documenter le changement climatique et les crises environnementales qui en découlent. Productrice de connaissances de très haut niveau, elle est déterminée à mieux les transmettre à toutes les sphères de la société qui auront besoin de son savoir pour limiter le changement et s'y adapter. Dans ce but, elle a besoin de préserver ses moyens, mais aussi de les développer, pour mettre sur pied un véritable service public de recherche sur le climat et l'environnement. Voici les **domaines qui nécessitent le soutien des décideurs** de l'échelle locale, à l'échelle nationale.

01

Les moyens lourds, déployables à l'échelle du globe, sont essentiels aux recherches fondamentales sur le système Terre.

→ Assurer le renouvellement du jet d'altitude de l'infrastructure de recherche IN AIR et maintenir la flotte océanographique française au meilleur niveau.

Le développement d'une instrumentation innovante est nécessaire à l'avancement des sciences du climat. C'est l'une des conditions du rayonnement de la recherche sur un territoire et de la dynamique de son industrie (développements de capteurs innovants, lancement de start-ups...).

02

→ Développer des appels d'offres régionaux soutenant la recherche instrumentale.

03

L'observation à long terme est une des clés de la compréhension des changements environnementaux en cours. Elle nécessite le renforcement des moyens des infrastructures de recherche du domaine Océan-Atmosphère et de leurs services nationaux d'observation.

→ Déclarer l'activité d'observation de long terme comme une mission nationale reconnue par décret, permettant d'une part la création de plus de postes du Corps national des astronomes et physiciens (CNAP) et d'autre part sa reconnaissance dans les missions des chercheurs et enseignants-chercheurs.

04

Les programmes nationaux coordonnés par le CNRS-INSU sont de formidables incubateurs des grands programmes de l'État (PEPR, ARR).

→ Mieux reconnaître ces programmes nationaux et en augmenter les moyens.

Face à l'urgence climatique, les besoins immédiats de connaissances nouvelles, mais aussi de formation et d'accompagnement scientifiques, sont gigantesques !

→ Permettre de recruter une nouvelle génération d'ingénieurs, de chercheurs et d'enseignants-chercheurs, qui développera les outils de compréhension du climat et de la pollution.

05

L'observation de la Terre depuis l'espace accroît de façon considérable nos connaissances. Elle sera déterminante pour l'atténuation et les futures adaptations. Elle est aussi un atout de compétitivité nationale.

→ Soutenir les missions spatiales liées à l'observation du système Terre, de même que la recherche en amont sur les capteurs spatiaux, en aval sur l'exploitation des données spatiales et préserver les moyens aéroportés de validation de ces données.

06

Chaque fois qu'une région cherchera à mieux comprendre sa trajectoire climatique et environnementale, elle trouvera sur son territoire un observatoire des sciences de l'Univers et ses laboratoires pour l'accompagner. Ces derniers ont en effet vocation à mettre leur compétence au service des Groupements régionaux d'experts sur le climat (GREC).

→ Mieux soutenir le fonctionnement des GREC, afin de s'appuyer davantage sur leur travail et d'être en retour force de sollicitation quant aux travaux à mener.

07

Les enjeux de la distribution et de la fusion de données sont considérables pour répondre à l'objectif de comprendre la machine climatique et le système Terre.

→ créer les conditions pérennes de soutien financier, de formation et de recrutement de *data scientists* au service de l'infrastructure DataTerra, pour développer la production de données par les laboratoires.

08

Les observatoires des sciences de l'Univers en régions



INSU

Institut national des sciences de l'Univers du CNRS

3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
+ 33 1 44 96 40 00

insu.cnrs.fr



Contact
Jean-François Doussin
insu.dasoa@cnrs.fr
01 44 96 43 22