



Menace sur l'océan

Marina Lévy

► To cite this version:

Marina Lévy. Menace sur l'océan. La jaune et la rouge [revue mensuelle de la société amicale des anciens élèves de l'Ecole Polytechnique], 791, 2024. hal-04401479

HAL Id: hal-04401479

<https://cnrs.hal.science/hal-04401479>

Submitted on 17 Jan 2024

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.

SOMMAIRE DU DOSSIER

- 23 **La machine océan est en train de se gripper**
par Marina Lévy (X89)
- 24 **Turbulences dans la machine océan**
par Bruno Blanke (X84)
et Casimir de Lavergne (X08)
- 27 **L'océan et le carbone : et les Shadoks pompaient, pompaient**
par Marina Lévy (X89)
et Stéphane Doléac (X18)
- 30 **Changement climatique : l'océan sous pression**
par Marie-Hélène Vuillemin
Tusseau (X87), Benoît Meyssignac (X99)
et Clara Azarian (X16)
- 34 **Les pays côtiers en développement face aux changements globaux**
par Marine Herrmann (X98)
et Yves Morel (X87)
- 38 **Observer l'océan : une conquête technologique**
par Jérôme Paillet (X87),
Fabrice Arduin (X94)
et Juliette Lambin (X94)
- 43 **Sur les sept mers du monde : la Flotte océanographique française**
par François Houllier (X78)
- 48 **Plongée numérique dans l'océan du futur**
par Pierre Bahurel (X89)
et Anne-Marie Tréguier (X79)
- 52 **Un océan de solutions ?**
par Olivier Laroussinie (X83)
et François Gauthiez (X87)
- 56 **Plaidoyer pour l'océan : de la science vers le politique**
par Éric Brun (X79), Romy Hentinger
et Patricia Ricard
- 60 **Hobart, en attendant**
par Olivier Poivre d'Arvor
- 63 **À propos de l'océan**
par Pierre Avenas (X65)



LA MACHINE Océan

EST EN TRAIN DE SE GRIPPER



MARINA LÉVY (X89)

directrice adjointe du département Océan de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'océanographie et du climat (LOCEAN-IPSL)

“La vision d'un océan infini et indestructible appartient au passé.”

Faut-il s'alarmer des dommages que nous infligeons à l'océan ou se réjouir de la protection qu'il nous assure ? Afin de bien appréhender l'ampleur des dérèglements en cours et de mettre en place des politiques adaptées, la science est essentielle ; elle permet de comprendre le fonctionnement de l'océan, cet acteur lent du système climatique qui abrite aussi une biodiversité incroyable.

L'océan est un élément critique d'un monde sain et propice à la vie, dont l'exploration difficile forge notre imaginaire et est source d'innovations, tout autant que la conquête spatiale. C'est le personnage principal de nombreuses épopées – *L'Illiade* et *L'Odyssée*, *Vingt mille lieues sous les mers*, *Moby Dick*... L'océan forme une unique et énorme masse d'eau, une machine à la fois mécanique, thermique, chimique et biologique : un formidable objet d'étude pour les scientifiques de toutes disciplines. Les polytechniciens océanographes sont d'ailleurs si nombreux que tous n'ont pu être sollicités pour ce dossier. La France ne s'y est pas trompée, en pilotant le *One Ocean Summit*, premier sommet international consacré à sa préservation.

Car la machine océan est en train de se gripper. Sa transformation visible et rapide en fait désormais un triste sujet d'actualité : *Le Monde* a consacré une série estivale aux pulsations de la terre, évoquant le risque d'un effondre-

ment de la folle richesse du courant de Humboldt et les conséquences catastrophiques de l'amplification du phénomène El Niño. Les pressions qui pèsent sur la santé des océans sont multiples : augmentation des températures et acidification, qui créent un effet domino sur la vie marine et amplifient inondations et cyclones tropicaux. Ces problèmes s'ajoutent à d'autres périls tels que la pollution et la croissance exponentielle des usages. Les communautés dépendantes de l'océan, particulièrement vulnérables dans les pays en développement, sont menacées.

Pourtant, l'océan se dresse comme un rempart puissant contre le changement climatique, grâce à sa capacité considérable à stocker la chaleur et le carbone. Mais la vision d'un océan infini et indestructible appartient au passé. Protéger l'océan pour qu'il continue de nous protéger, depuis le littoral jusqu'aux grands fonds, exige une approche poly-technique et une gouvernance adaptée. « Comment pensons-nous la mer ? », s'interroge le philosophe Roberto Casati. « La mer est un contenant et un contenu en même temps. » Ainsi ces deux aspects doivent être pensés ensemble, en préservant le contenant pour éviter l'effondrement du contenu. X

L'océan en images : Alexis Rosenfeld

Photographe et explorateur sous-marin, Alexis Rosenfeld mène en collaboration avec l'Unesco le projet 1 OCEAN.

Il est le cofondateur de la Fondation 1 OCEAN, sous l'égide de la Fondation CNRS.

Son travail photographique présent dans ce dossier nous offre une narration de l'océan, un témoignage de ses richesses, de sa beauté et des menaces qui pèsent sur lui.

Son prochain projet, qui débutera en 2024, aura pour thème « Forêts sous-marines, un enjeu pour l'humanité ».

© Alexis Rosenfeld

← Raie manta, aussi appelée « diable de mer ».



← Phénomène de houle pendant l'hiver austral.



BRUNO BLANKE (X84)
ancien directeur adjoint
scientifique Océan
Atmosphère de l'Institut national
des sciences de l'univers du
CNRS, directeur de recherche
CNRS au Laboratoire
océanographie physique
et spatiale (LOPS)



**CASIMIR
DE LAVERGNE (X08)**
chargé de recherche CNRS
au Laboratoire d'océanographie
et du climat (LOCEAN-IPSL)

Tel un voyageur qui explore un pays en passant de ville en ville en train, puis en se déplaçant à bicyclette de quartier en quartier, avant de se plonger à pied dans un dédale de ruelles, nous découvrons la complexité profonde des structures dynamiques de l'océan en ajustant notre vision à une multitude d'échelles, aussi abondantes que variées. Lorsque le visiteur rentrera chez lui, qu'il se souvienne que l'architecture des lieux qu'il a arpentés est fragile, qu'elle vacille parfois sous le poids du changement climatique.

Faisant fi de toute rivalité entre les océans Atlantique, Pacifique et Indien pour savoir lequel est le plus vaste, la projection de Spilhaus présentée ci-contre réunit harmonieusement tous les océans de la Terre, mettant en lumière leur contribution collective à la machine océan. Dans cette vue d'ensemble, l'océan dévoile la grandeur de sa dynamique, dont l'expression la plus emblématique est un réseau mondial de courants superficiels et profonds, appelé circulation thermohaline et illustré par un tapis roulant planétaire. Cette représentation des océans du globe souligne l'immensité des masses d'eau qui s'entremêlent et circulent autour de la planète, transcendant les frontières entre les différents domaines maritimes que l'homme a l'habitude de désigner individuellement. Pour comprendre la machinerie océane, l'observation le long des côtes et des routes maritimes ne suffit pas : il est nécessaire d'échantillonner la longueur et la profondeur des océans, jusqu'aux mers les plus tempétueuses ou les plus reculées. Cette exploration scientifique se poursuit chaque jour, grâce à la collaboration de nations de tous les continents, nourrissant des découvertes majeures scandées par les observations nouvelles et les avancées théoriques. Le caractère exploratoire de l'océanographie en fait un voyage passionnant pour qui s'intéresse aux rouages de notre « planète bleue ».

Par vents et marées

La projection de Spilhaus permet de visualiser commodément la circulation thermohaline, dont le cycle complet est millénaire. Dans les régions tropicales, les premières centaines de mètres de l'océan sont généreusement réchauffées par les rayons du Soleil et les eaux devenues plus légères s'accumulent et voyagent naturellement dans les couches de surface. En s'acheminant vers les régions polaires, ces eaux tropicales emportent avec elles la chaleur emmagasinée. Au fur et à mesure de leur progression, elles se refroidissent, tandis que leur teneur en sel peut augmenter sous l'effet d'une évaporation intense. Aux hautes latitudes, ces eaux refroidies et lourdes plongent en profondeur, alimentant des courants qui se déploient à travers l'obscurité des abysses. Ce mouvement planétaire repose sur les modifications thermiques et salines de l'eau de mer, mais aussi sur les oscillations des marées et l'action mécanique des vents de surface, qui fournissent l'énergie cinétique de la circulation. La circulation thermohaline constitue la charpente du système circulatoire de l'océan, régénérant l'ensemble de ses réservoirs en nutriments et autres composants essentiels à la vie.

Sous-systèmes

Superposés à cette circulation thermohaline mondiale, de nombreux systèmes de courants régionaux peuplent

↓ Meredith, M.P. "The global importance of the Southern Ocean and the key role of its freshwater cycle". *Ocean Challenge*, 23, 2, 27-32, 2019.

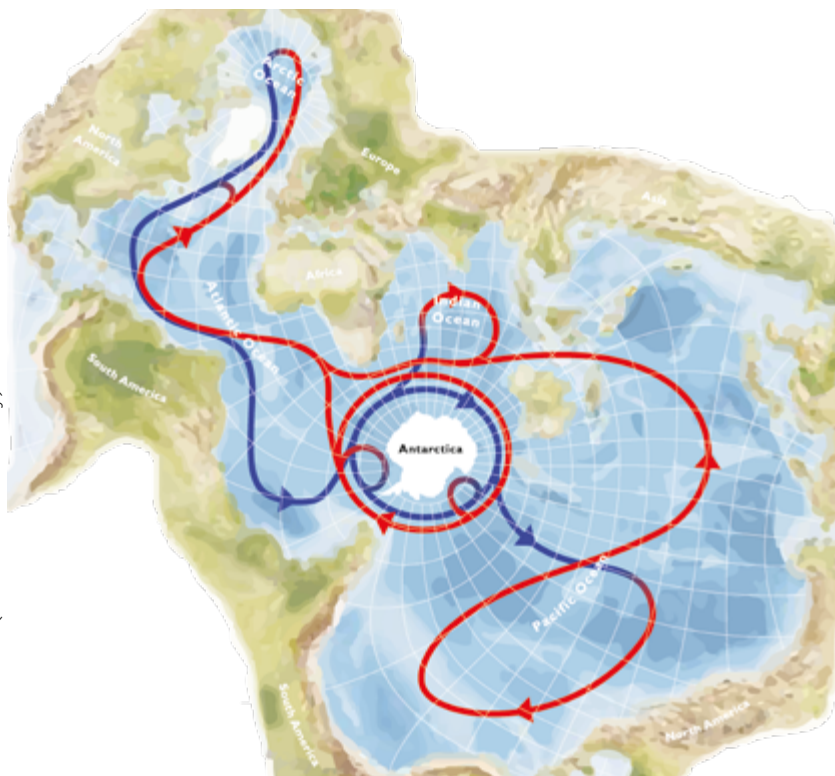
les grands bassins océaniques. Ces systèmes sont principalement induits par les vents et contraints par la géométrie des continents et la rotation de la Terre. Les plus remarquables sont la circulation annulaire autour du continent antarctique et les vortex géants, également appelés gyres, présents à différentes latitudes de chaque bassin océanique. Dans l'Atlantique Nord, le Gulf Stream alimente la branche supérieure de la circulation thermohaline, qui transporte les eaux chaudes de l'équateur vers les régions polaires, mais aussi le gyre régional qui se referme sur lui-même au sein du bassin. Cet exemple illustre l'imbrication des différentes boucles et échelles de circulation, rendant extrêmement délicate l'interprétation des variations observées dans les mouvements de l'océan.

Cascades et chaos

De fait, l'océan présente une variété impressionnante de caractéristiques dynamiques, telles que des courants, des tourbillons, des ondes et des fronts entre différentes masses d'eau. Ces signaux se forment à des échelles qui ne se limitent pas à la circulation thermohaline et aux gyres océaniques. L'observation du niveau de la mer à partir des dernières générations d'altimètres embarqués sur des satellites a confirmé que l'océan planétaire regorge de structures à des échelles plus petites, comme les tourbillons de méso-échelle (de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres de diamètre) et de subméso-échelle (de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres). Des filaments, des fronts et de petits tourbillons forment autant de ruelles qu'un voyageur trop empressé ignorerait à tort dans sa découverte du pays traversé. Ces différentes échelles interagissent en permanence, les courants océaniques de grande échelle influençant la formation et la dynamique des structures à plus petite échelle, tout en étant eux-mêmes influencés par ces dernières. Cette cascade complexe d'interactions, fascinante et encore méconnue, représente un défi majeur pour la science, en raison des limitations dans l'observation et la modélisation des échelles les plus fines. Sa compréhension revêt une importance cruciale, car ces fines échelles assurent une grande partie du transport vertical de quantités aussi importantes que la chaleur ou le carbone, tout en régulant la dissipation de l'excès d'énergie captée par l'océan aux plus grandes échelles.

Colosse climatique

L'océan opère comme un réservoir colossal de chaleur, grâce à sa masse considérable (300 fois celle de l'atmosphère) et à la capacité thermique élevée de l'eau de mer (quatre fois celle de l'air). Un exemple frappant en est la captation d'environ 90 % de l'excès →



→ d'énergie résultant du réchauffement climatique. Ce rôle d'éponge se révèle essentiel pour modérer les fluctuations du climat terrestre. Il se double d'un rôle de redistribution de la chaleur depuis l'équateur vers les pôles, et depuis la surface vers les profondeurs, qui façonne le climat mondial, ses contrastes régionaux et ses variations dans le temps. Ces transferts de chaleur sont accomplis par toute la gamme d'échelles des courants océaniques, en interaction étroite avec l'atmosphère. Le phénomène El Niño, par exemple, représente un déstockage périodique de chaleur océanique (tous les trois à sept ans), gouverné par le couplage océan-atmosphère et influencé par une panoplie de courants, d'ondes et de turbulences océaniques en interaction. La compréhension et la modélisation de ces mécanismes ouvrent la voie à une meilleure prévision des variations climatiques, à une évaluation plus précise des impacts du réchauffement climatique et à un développement de stratégies d'adaptation et d'atténuation plus efficaces.

Gardien d'équilibres planétaires

Outre la chaleur, les courants océaniques transportent nombre de substances vitales. L'océan absorbe une quantité considérable de CO₂ atmosphérique, que les courants descendants séquestrent ensuite en profondeur, ce qui affecte les niveaux de CO₂ dans l'atmosphère et, par conséquent, le climat. Il absorbe aussi de l'oxygène (O₂) en surface, qu'il redistribue vers les couches sous-jacentes, permettant ainsi la respiration des organismes marins. Parallèlement, les eaux profondes qui remontent à la surface apportent des éléments nutritifs comme le fer, le nitrate et le phosphate, nécessaires à la croissance du phytoplancton, à la base de la chaîne alimentaire océanique. Les échanges verticaux au sein de l'océan conditionnent donc l'équilibre du climat et des écosystèmes marins, dont dépendent la vie sur Terre et nos sociétés.

Effet papillon

Le rôle fondamental de la circulation océanique dans les grands équilibres de la planète reflète également la réalité selon laquelle toute perturbation peut avoir d'importantes conséquences sur le climat mondial et la vie marine : les changements de température, combinés aux altérations des courants océaniques, ont la capacité d'influencer les régimes météorologiques régionaux et de perturber les habitats marins. L'accroissement de l'effet de serre se manifeste déjà par des conséquences néfastes telles que la succession de vagues de chaleur marines inédites, la fonte des glaces polaires et la montée du niveau marin, ou la réduction des échanges verticaux due à l'accumulation de chaleur et d'eau douce en surface.

**“Captation
d'environ
90 % de l'excès
d'énergie
résultant du
réchauffement
climatique.”**

Ces modifications ont des répercussions sur les températures et précipitations continentales, sur la distribution des espèces marines et sur les équilibres écologiques en général.

Frontière sous-marine

Les fonds marins, souvent négligés en raison de la difficulté à les observer, sont une pierre angulaire du fonctionnement de l'océan, car ils contribuent largement à guider et à dissiper la circulation océanique. Leur meilleure connaissance est essentielle pour comprendre pleinement la dynamique océanique, la biodiversité et le climat. Les dorsales océaniques, les fosses sous-marines, les monts sous-marins et les plateaux continentaux sont le résultat de processus tectoniques et volcaniques qui sculptent la structure de la Terre. La géométrie et l'intensité des courants océaniques, notamment ceux qui composent la circulation thermohaline, dépendent à toutes les échelles de mouvement de ce relief caché. Comme nous l'avons vu, les échanges de chaleur, de carbone et de nutriments entre l'océan de surface et les couches profondes jouent un rôle crucial dans le climat global. Une meilleure compréhension de ces échanges, notamment des processus de turbulence accentués près de la rugosité du fond marin ou des courants profonds, permettrait de prévoir avec plus de précision les variations climatiques à l'échelle régionale et mondiale.

Remonter dans le temps

Les fonds marins abritent également des écosystèmes riches et diversifiés, et nous avons beaucoup à apprendre sur leurs interactions avec la circulation océanique et le transport des propriétés physico-chimiques. La circulation près des fonds peut influencer la distribution des nutriments, des particules organiques et des espèces marines. Appréhender ces interactions écosystémiques est essentiel pour une gestion durable des ressources marines et la préservation de la biodiversité. Enfin, les sédiments qui se sont progressivement accumulés sur les fonds marins renferment des informations précieuses sur les variations passées du climat. En prélevant des carottes de sédiments et en les analysant en laboratoire, les scientifiques remontent dans le passé sur une échelle allant jusqu'à plusieurs millions d'années et reconstruisent les variations de certains paramètres environnementaux. Ces archives naturelles dévoilent des transformations coordonnées du climat et de la circulation océanique, offrant une vision à long terme du fonctionnement de la machine océan, un voyage dans le passé fondamental pour comprendre les mécanismes et prédire les changements futurs. ✕

L'OCÉAN ET LE CARBONE : ET LES SHADOKS POMPAIENT, POMPAIENT...



MARINA LÉVY (X89)

directrice adjointe
du département Océan de
l'Institut de recherche pour
le développement (IRD),
directrice de recherche CNRS
au Laboratoire d'océanographie
et du climat (LOCEAN-IPSL)



**STÉPHANE
DOLÉAC (X18)**

doctorant IPEF au Laboratoire
d'océanographie et du climat
(LOCEAN-IPSL)

L'océan est un gigantesque réservoir de carbone. On estime qu'il renferme 40 000 gigatonnes (Gt) de carbone, soit cinquante fois plus que l'atmosphère. Chaque année, ces deux réservoirs s'accroissent d'une partie des émissions de CO₂ relâchées par les activités humaines. Le rôle de puits de carbone de l'océan est réaffirmé par chaque nouveau rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (le GIEC). Mais ce rempart naturel contre le changement climatique montre des signes d'affaiblissement. À tel point que des solutions artificielles sont envisagées pour le renforcer. Sans doute en vain, et avec des risques pour l'environnement.

2,5 gigatonnes (Gt) : c'est la quantité de carbone que l'océan a séquestrée en moyenne chaque année au cours de la dernière décennie. Cela correspond peu ou prou au quart des émissions annuelles de CO₂ d'origine anthropique, c'est-à-dire du carbone relâché dans l'atmosphère par l'activité humaine, principalement la combustion du pétrole, du charbon et du gaz. La biosphère continentale en stocke, elle, environ un tiers et le reste s'accumule dans l'atmosphère. La capacité naturelle de l'océan à pomper le carbone en fait un puissant

amortisseur contre le changement climatique. Les progrès de la recherche ont permis d'évaluer ce puits de carbone avec une précision croissante, de comprendre son fonctionnement, de suivre son évolution dans le temps et d'anticiper son évolution future en réponse à nos émissions de carbone. La compréhension des pompes de carbone relève de la biogéochimie marine, une discipline relativement récente. Lorsque le plus ancien d'entre nous démarra sa thèse en 1993, les modèles de cycles du carbone en étaient à leur balbutiement. Trente ans plus tard qu'a-t-on appris et quelles sont les grandes questions pour la nouvelle génération de chercheurs, dont le plus jeune d'entre nous fait partie ? Le présent article de synthèse est aussi un dialogue entre générations et un passage de relai sur un enjeu clé pour le climat.

Un fonctionnement par système de pompes

Deux systèmes de pompes régissent l'absorption du carbone par l'océan. La première pompe est physico-chimique : lorsque les eaux tropicales superficielles chaudes sont entraînées vers les hautes latitudes, elles se refroidissent. Ce refroidissement augmente leur capacité à dissoudre le CO₂ atmosphérique, tout en augmentant leur densité. Une fois arrivées aux latitudes polaires, elles plongent en profondeur et emportent avec elles le CO₂, qui est ainsi soustrait à tout contact avec l'atmosphère pour des centaines d'années. La seconde pompe est biologique : elle résulte de la fixation du →

→ CO₂ atmosphérique par le phytoplancton, autrement dit l'ensemble des micro-organismes marins photosynthétiques qui flottent dans la couche superficielle des océans. Cyanobactéries, picoflagellés, diatomées et autres coccolithophoridés assurent à eux seuls environ la moitié de la production primaire de la planète, en utilisant le CO₂ pour synthétiser des molécules carbonées organiques. La chaîne alimentaire entre ensuite en action : le phytoplancton est brouté par le zooplancton, des animaux planctoniques qui sont consommés à leur tour par des organismes plus grands, et ainsi de suite. Une partie de ce carbone est rejetée dans les profondeurs sous forme de déchets organiques – cadavres, particules fécales – et est ainsi isolée de l'atmosphère. Comme la pompe physico-chimique, la pompe biologique est particulièrement active dans les zones de latitude comprises entre 40° et 60° dans les deux hémisphères (Atlantique Nord, Pacifique Nord et une partie de l'océan Austral). À l'inverse, dans le Pacifique équatorial, l'Atlantique équatorial et l'ouest de la mer d'Arabie, les eaux plus profondes remontent vers la surface et recrachent dans l'atmosphère une partie du CO₂ qu'elles ont emmagasiné. La séquestration de carbone anthropique représente un déséquilibre de quelques pour cent seulement entre les flux de CO₂ entrant et sortant dans l'océan, ce qui la rend particulièrement difficile à mesurer.

Une protection naturelle qui s'essouffle

Anticiper l'évolution de la capacité de l'océan à piéger le CO₂ au cours du ^{xxi}e siècle est essentiel pour la mise en place d'une politique climatique. La trajectoire de la réduction de nos émissions pour atteindre l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050 repose sur cette évaluation. Le puits océanique de carbone a connu une croissance quasi linéaire au cours des soixante dernières années, passant d'une valeur proche de 1 Gt par an dans les années 1960 à la valeur maximale de 2,5 Gt par an estimée aujourd'hui. Cette croissance est une réponse directe à l'augmentation de CO₂ dans l'atmosphère. Mais, durant cette même période, l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère s'est accélérée, passant d'une partie par million (ppm) par an dans les années 1960 à plus de deux ppm par an aujourd'hui. Ainsi, tels les Shadoks qui s'usent à pomper en vain, on sait désormais avec certitude que l'efficacité de l'océan à piéger le CO₂ a déjà diminué. C'est ce que nous anticipions et suivions de près depuis une vingtaine d'années, et qui a été confirmé dans le dernier rapport du GIEC. Les projections analysées par le GIEC montrent par ailleurs que la proportion des émissions de CO₂ captée par les océans est deux fois plus faible dans un scénario de développement riche en

combustibles fossiles que dans un scénario de développement durable. En d'autres termes, plus nous sommes vertueux et diminuons nos émissions, plus l'océan pourra continuer à nous protéger.

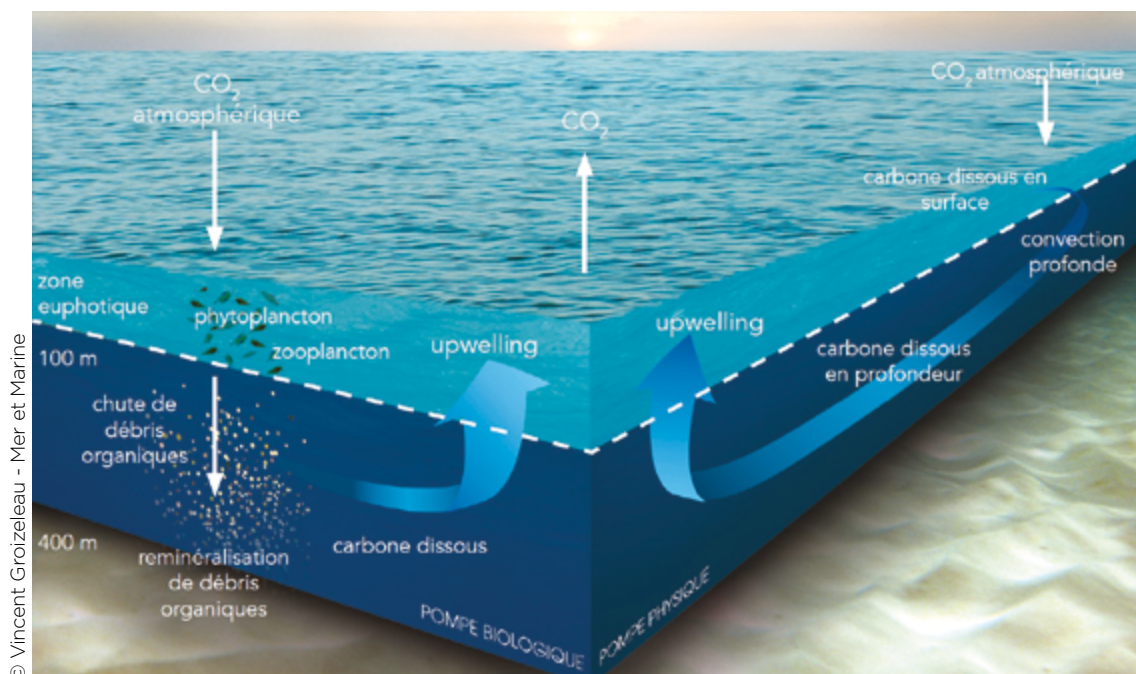
Un essoufflement dû à des facteurs multiples

Le cycle du carbone dans l'océan mêle intimement des processus chimiques, biologiques et physiques. Tous interviennent dans l'évolution des pompes à carbone. Ils sont tous pris en compte à l'heure actuelle dans les efforts de projection du changement climatique, mais compris à des degrés divers. Les processus chimiques sont les plus simples à prévoir. Plus l'océan absorbe de CO₂, plus il devient acide. Et plus il est acide, moins il peut pomper de CO₂. Cela signifie que l'augmentation du CO₂ atmosphérique entraîne une diminution de la capacité de l'océan à capturer le CO₂. Autre paramètre dont l'évolution explique un ralentissement de la pompe : l'augmentation de la température des eaux de surface. Des eaux plus chaudes dissolvent moins facilement le CO₂, ce qui diminue son absorption.

Des connaissances encore incomplètes

À l'opposé, l'évolution des processus biologiques est d'une extrême complexité. En effet, le phytoplancton n'a rien d'une entité homogène. Toutes les espèces qui le composent ne réagissent pas de la même façon au changement climatique en cours et il est difficile d'anticiper la réponse de l'écosystème dans son ensemble. Le développement et la généralisation de l'analyse génomique ont permis de faire un bond en avant dans la description de la complexité de la vie microbienne dans l'océan, mais on sait encore peu de chose sur son potentiel d'adaptation. Dans de vastes régions océaniques, on a toutefois observé un ralentissement de la pompe, notamment grâce à un suivi de plus de vingt ans d'imagerie satellite. On explique ce ralentissement par l'augmentation de la température des eaux de surface, qui entraîne une stratification plus prononcée des couches océaniques : les eaux intermédiaires ont plus de mal à atteindre la couche de surface où se trouve le phytoplancton. Or c'est la remontée de ces eaux qui apporte au phytoplancton les sels nutritifs dont il a besoin. Résultat : la croissance du phytoplancton diminue, ce qui réduit le flux de carbone sous forme de particules vers le fond de l'océan. Mais, là encore, nous avons beaucoup à apprendre sur cet export particulier de carbone ; il a longtemps été expliqué par la gravitation, les particules coulant vers le fond de l'océan, mais d'autres voies sont progressivement découvertes, certaines liées à la migration verticale de quelques espèces

“Les techniques de captation de carbone par les océans ne sont ni mûres, ni prêtes à être mises en œuvre.”



© Vincent Groizeleau - Mer et Marine

← Cycle du carbone naturel.

et d'autres au transport par des courants verticaux très fins et très intenses, qui ont été mis en évidence il y a une vingtaine d'années et dont la contribution précise reste encore à évaluer.

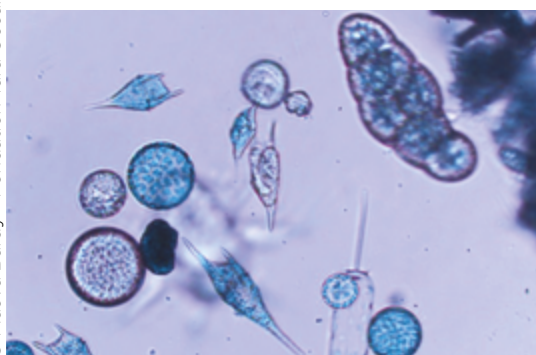
Des incertitudes certes, mais des évolutions qui vont toutes dans le même sens

Outre les pompes chimiques et biologiques, il est à craindre que l'efficacité de la pompe physique de carbone diminue également. Là encore, de nombreuses incertitudes subsistent, notamment car la circulation thermohaline, qui emporte le carbone depuis la surface vers le fond des océans, présente une variabilité naturelle forte. Si les premiers signes de ralentissement de cette circulation sont là, il est encore difficile de prévoir son évolution future, et en particulier de savoir si des points de basculement du système sont à craindre au cours du XXI^e siècle. Cela est lié à plusieurs verrous, tels que notre incapacité actuelle à bien intégrer toutes les échelles de la turbulence océanique et les incertitudes entourant l'intensité et la rapidité de la fonte de la banquise au cours des prochaines décennies.

Le mirage de la géo-ingénierie

Si l'on en croit la maxime des Shadoks, « il vaut mieux pomper, même s'il ne se passe rien, que risquer qu'il se passe quelque chose de pire en ne pompant pas ». Plusieurs techniques d'augmentation artificielle du puits de carbone océanique sont aujourd'hui envisagées. Fertilisation des océans, plantations de macroalgues, remontée artificielle d'eaux profondes riches en sels nutritifs ou encore déplacement des équilibres fondamentaux de la chimie océanique du carbone, les idées ne manquent pas. Leur potentiel de capture de carbone est néanmoins très controversé et la faisabilité d'un déploiement à grande échelle n'a pas été démontrée ;

© Maéva Bardy - Fondation Tara Océan



← Plancton de Patagonie.

il faudrait qu'elles soient massivement déployées pour avoir un impact significatif sur le climat, ce qui n'est même pas garanti. La question même de la vérification de l'efficacité de ces techniques n'est pas résolue, en partie en raison du caractère non local des flux de carbone dans l'océan. Les effets secondaires néfastes associés à ces techniques sont potentiellement nombreux (bouleversement des équilibres écologiques locaux, pollution aux métaux, acidification...) et encore mal compris. À l'heure actuelle, les techniques de captation artificielles de carbone par les océans ne sont ni mûres, ni prêtes à être mises en œuvre, et pourraient faire plus de mal que de bien. Ainsi, n'en déplaise aux Shadoks, les connaissances actuelles sur ces techniques sont encore largement insuffisantes pour qu'on puisse envisager de les déployer à grande échelle. Des efforts de recherche importants sont encore nécessaires avant d'espérer aboutir à des solutions fiables, viables et quantifiables de capture et stockage de carbone par l'océan. Pour limiter le réchauffement de la planète à moins de 1,5 °C ou 2 °C au cours de ce siècle, les solutions de captation de carbone seront nécessaires mais ne seront pas des solutions miracles. ✕

CHANGEMENT CLIMATIQUE : L'OCÉAN SOUS PRESSION



**MARIE-HÉLÈNE
VUILLEMIN
TUSSEAU (X87)**

ancienne directrice scientifique
Environnement, Univers au
ministère de l'Enseignement
supérieur et de la Recherche



**BENOÎT
MEYSSIGNAC (X99)**

auteur du rapport spécial océan
cryosphère du GIEC, chercheur
CNES au Laboratoire d'études en
géophysique et océanographie
spatiales (LEGOS)



CLARA AZARIAN (X16)

doctorante IPEF au Laboratoire
d'océanographie et du climat
(LOCEAN-IPSL)

On a longtemps pensé que l'océan était aussi immuable que son pH de 8,2 ou la proportion des sels marins. Puis de nombreuses avancées scientifiques ont permis de mettre en lumière le dynamisme de l'océan et sa variabilité à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi que ses échanges avec l'atmosphère. L'océan est un acteur majeur du système climatique. Il nous protège en absorbant chaleur et CO₂, ce qui le réchauffe et l'acidifie. Le changement climatique exerce donc une double pression sur l'océan, dont les scientifiques constatent les effets dès à présent et sans équivoque. Si l'on a souvent tendance à les présenter un par un, les effets du changement climatique ne sont pourtant pas isolés les uns des autres et leur combinaison accroît la menace qui pèse sur les écosystèmes océaniques.

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre d'origine anthropique a diminué la quantité d'énergie réémise par la Terre vers l'espace. En conséquence, la Terre reçoit aujourd'hui plus d'énergie du Soleil qu'elle n'en réémet vers l'espace et elle accumule cette énergie, essentiellement sous forme de chaleur. Ce faisant, la Terre se réchauffe et augmente progressivement ses émissions radiatives vers l'espace. Cette période transitoire de réchauffement est ce qu'on appelle le « changement climatique », qui va durer jusqu'à ce que les émissions de la Terre vers l'espace compensent à nouveau l'énergie reçue du Soleil. Dans le nouvel équilibre que la Terre atteindra (dans quelques siècles), les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre seront plus élevées et l'augmentation globale de température aura changé significativement l'environnement. L'amplitude de ces changements et de leurs effets dépend de nos émissions actuelles et à venir.

Aide-toi et l'océan t'aidera

L'océan absorbe de 20 à 30 % des émissions de CO₂ d'origine anthropique et, à lui seul, capte 91 % du réchauffement de la planète. Cela est dû à sa capacité calorifique supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du reste du système climatique (atmosphère,

surfaces continentales, calottes polaires, glaciers, etc.). En captant cette chaleur et en la piégeant dans ses couches profondes, l'océan ralentit considérablement le changement climatique, de plusieurs décennies à quelques siècles. De ce fait, la surface de la Terre se réchauffe lentement et offre à la plupart des espèces, dont l'humanité, plus de temps pour s'adapter. Ce décalage temporel est aussi une occasion à saisir pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, car plus nous les réduirons dans cet intervalle de temps plus l'océan atténuera et ralentira l'effet du réchauffement climatique. En d'autres termes, aide-toi et l'océan t'aidera ! Mettons donc à profit cette possibilité offerte par un océan si grand et réduisons dès maintenant nos émissions de gaz à effet de serre pour vivre mieux aujourd'hui et demain !

La montée du niveau de la mer s'accélère

Le réchauffement de l'océan entraîne de nombreuses modifications de la physique de l'océan. Par la dilatation de l'eau de mer, le réchauffement contribue à augmenter le niveau de la mer. De plus, le réchauffement de la cryosphère fait fondre les glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires – Groenland et Antarctique), ce qui ajoute de l'eau à l'océan. Ces deux processus expliquent plus de 90 % de la hausse du niveau de la mer observée depuis le début du ^{xx}e siècle. Cette hausse est plus de trois fois supérieure à la hausse maximale observée sur les 4 000 dernières années et elle s'accélère depuis les années 2010, du fait en particulier de l'accélération de la fonte des calottes polaires. C'est l'impact du réchauffement climatique le plus connu du grand public. De fait, chacun peut déjà en voir les impacts, même sur nos côtes, avec des submersions plus importantes lors des événements extrêmes, une érosion accélérée, la salinisation des terres et des aquifères côtiers ou encore la destruction d'écosystèmes côtiers tels que les mangroves ou les marais maritimes.

La fonte des calottes polaires : un point de non-retour ?

Les calottes polaires sont les grandes masses de glace situées aux pôles, qui se forment par accumulation de neige à leur surface et qui s'écoulent lentement vers la mer le long des bassins versants. Depuis les années 1990, on observe par satellite que l'accumulation de neige à la surface des calottes diminue, en particulier sur le Groenland et dans une moindre mesure sur la péninsule antarctique, cette distinction entre les pôles étant due aux différences de géographie et de circulation océanique. Mais il y a plus inquiétant. On observe que l'écoulement vers la mer des calottes polaires s'accélère. L'océan,



↑ Inondation de zones côtières du Bengale occidental, Inde.

réchauffé, vient éroder les langues de glace à leur ligne d'échouage, diminuant ainsi l'effet bouchon et accélérant l'écoulement du bassin versant en amont. Or, pour de nombreux bassins versants de l'ouest de l'Antarctique, la géométrie locale du socle rocheux sur lequel s'appuie la glace est telle que l'écoulement de l'ensemble du bassin versant est instable. Cela veut dire que ces bassins versants se déverseraient entièrement et de manière irréversible dans l'océan, si celui-ci venait à éroder leur langue de glace. On pense que certains bassins versants sont déjà déstabilisés et l'on estime que le changement climatique pourrait déstabiliser à terme suffisamment de bassins versants pour provoquer une hausse du niveau de la mer de 7 mètres en quelques siècles ! Cependant, en diminuant les émissions de gaz à effet de serre, non seulement moins de bassins versants seront déstabilisés mais, en plus, l'écoulement de la glace vers l'océan sera ralenti, différant d'autant la hausse du niveau de la mer.

Des menaces globales aux impacts régionaux : importance de la dynamique océanique

Traduire ces menaces globales en impacts sur les écosystèmes nécessite une descente à l'échelle régionale et une prise en compte d'effets combinés sur des échelles de temps plus courtes. Par exemple, les vagues de chaleur marines peuvent s'accompagner d'événements extrêmes de pH ou de larges zones d'anoxie (diminution forte, voire absence d'oxygène dissous dans l'eau). On parle alors d'« événement composé à plusieurs variables ». Le plus célèbre a été baptisé « le Blob » et s'est déroulé au nord-est de l'océan Pacifique entre 2013 et 2015, avec des températures très élevées (anomalie de plus de 5 °C sur plus de 350 jours) et des concentrations en →

→ oxygène et un pH anormalement bas. Cela a conduit à une baisse de la productivité primaire, à de fortes mortalités d'oiseaux marins, de cétacés et de poissons, en particulier ceux ne pouvant pas migrer. On manque encore de recul sur la canicule de 2022 en Méditerranée, mais des plongeurs ont décrit des gorgones « brûlées, comme les forêts du continent ». De tels événements combinés sont favorisés par une plus grande stratification de l'océan liée au réchauffement climatique et pourraient devenir plus fréquents dans le futur.

Une acidification de l'océan déjà en cours

C'est parce que la solvatation du CO_2 conduit à la formation d'acide carbonique (H_2CO_3) que les océans s'acidifient progressivement. Les auteurs du GIEC estiment, sur le fondement de séries temporelles de plus de quinze ans, que les eaux de surface de l'océan ouvert ont perdu en moyenne de 0,017 à 0,027 unité de pH par décennie depuis la fin des années 80. Cette acidification n'est pas uniforme, elle est beaucoup plus marquée dans les zones d'*upwelling* et aux hautes latitudes. Avec un pH moyen des eaux de surface de 7,9 à la fin du siècle prochain, il ne faut pas s'attendre à voir les coquillages se dissoudre, comme si on les plongeait dans du jus de citron ! Néanmoins, le scénario d'émissions de CO_2 le

↘ Après les épisodes de canicule marine en Méditerranée, le taux de mortalité de certaines espèces a été très important. Ici une gorgone rouge (*Paramuricea clavata*) à moitié dénudée laisse apparaître son squelette.

↘ Un des premiers signes visibles du réchauffement de l'océan est le tristement célèbre blanchissement des coraux. Ici à Moorea en Polynésie française sur la pente externe du lagon en mai 2019.

plus pessimiste du GIEC prévoit que les eaux de mer des régions polaires, ainsi que du Pacifique Nord et de l'Atlantique Nord-Ouest, deviennent corrosives pour la plupart des formes minérales de carbonate de calcium d'ici à 2080-2100, ce qui augurerait de profonds bouleversements écosystémiques et biogéochimiques.

L'impact sur de multiples organismes marins

De très nombreux organismes marins s'appuient sur un exosquelette en carbonate de calcium (coccolithophores, coraux) ou s'abritent dans une coquille (tous les mollusques). Avec un pH légèrement abaissé, la biominéralisation reste possible mais devient plus coûteuse



© Alexis Rosenfeld



© Alexis Rosenfeld

en énergie pour les organismes, pénalisant leurs autres fonctions vitales (métabolisme, croissance, reproduction), déjà éprouvées par le réchauffement et les pollutions. Sont concernés les coccolithophores, des algues unicellulaires ubiquistes dont l'exosquelette est constitué de minuscules plaques de calcite. Premier maillon de la chaîne trophique, elles fixent la moitié de la calcite océanique et participent à la pompe à carbone de l'océan. Sont concernés également les emblématiques récifs coralliens, qui fabriquent un squelette calcaire que l'acidification fragilise, d'autant plus qu'elle est associée à l'élévation du niveau de la mer, de la température et à diverses pollutions. Moins exotiques mais plus proches de nous, les bancs de maërl, habitats remarquables pour d'autres espèces, formés par un ensemble d'algues, dont des algues calcaires produisant de la calcite magnésienne, sensible à l'acidification. Parmi les espèces directement exploitées par l'homme, tous les mollusques sont potentiellement sensibles à l'acidification. Enfin les poissons, en dépit de leur bonne capacité d'homéostasie, souffrent également de l'acidification. Des observations réalisées au voisinage de panaches hydrothermaux sous-marins ont montré que l'acidité affectait leur système nerveux, les rendant par exemple incapables de retrouver leur abri ou de se protéger de leur prédateur. Des problèmes similaires à ceux que rencontrent sur le continent les abeilles exposées aux néonicotinoïdes !

Un changement climatique favorable à certaines espèces toxiques

Bien que le déclenchement des efflorescences de microalgues toxiques et leur dynamique soient encore mal compris, il a été montré très récemment que le changement climatique augmentait leur risque d'occurrence, du fait d'une température plus élevée et d'apports en nutriments plus favorables. Ces microalgues sont accumulées par les coquillages et par les poissons herbivores qui les transmettent à leurs prédateurs et à l'homme. En Europe, elles sont surveillées pour limiter le risque sanitaire. On doit cependant compléter ce panorama avec *Gambierdiscus toxicus*, un dinoflagellé benthique responsable de la plus fréquente des maladies dues aux produits de la mer : la ciguatera. Il s'agit d'une grave intoxication qui touche chaque année plus de 50 000 personnes, localisées principalement dans la ceinture intertropicale du Pacifique et de l'Atlantique. Les cas les plus proches de l'Europe se trouvent aux Açores, mais la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie sont très touchées. Or *Gambierdiscus* a la particularité de se développer sur des coraux morts, où il est ensuite brouté par les poissons. Par le passé, il a déjà été observé des gains de prolifération après des

“Continuer à bénéficier des multiples contributions d'un océan en bonne santé.”

épisodes de blanchiment de coraux. Il ne fait donc aucun doute que l'élévation de température, fatale aux coraux, sera propice à *Gambierdiscus*, ce qui remet potentiellement en question le régime alimentaire de centaines de milliers de personnes.

La fuite des espèces mobiles

Avec le changement climatique, les habitats des espèces peuvent être déplacés, voire se contracter au bénéfice de nouveaux habitats. Certaines espèces sont mobiles et peuvent accompagner le changement en se déplaçant pour rester dans des conditions favorables. On observe déjà par exemple une « atlantification » de l'Arctique qui s'accompagne d'un déplacement des communautés de poissons. Ces migrations introduisent une forte incertitude dans la gestion des pêches actuelles. En effet, les stocks sont le plus souvent gérés à travers des quotas de pêches alloués (et ardemment négociés !) pour une zone fixe, délimitée. Outre une complexité accrue pour évaluer l'état des stocks, de telles migrations peuvent avoir de fortes conséquences économiques et géopolitiques. Un exemple fameux est celui de la « guerre du hareng » déclenchée dans les années 2000 après la migration du stock de hareng pêché par l'Union européenne et la Norvège vers la zone économique exclusive des îles Féroé. Ce phénomène va s'accroître avec le changement climatique et on s'attend aussi, par exemple, à ce que les thons listao, patudo et à nageoires jaunes dans l'océan Pacifique migrent en dehors des juridictions nationales, ce qui pourrait entraîner une baisse jusqu'à 17 % des recettes annuelles de certains petits États insulaires du Pacifique comme Nauru ou Kiribati.

Agissons !

Les scientifiques du monde entier, et parmi eux de très nombreux Français, ont été aux avant-postes du diagnostic du changement climatique et de la création du GIEC en 1988. Grâce à eux, grâce à leurs successeurs, nous avons les moyens de comprendre ces séquences météorologiques déroutantes et meurtrières qui adviennent de plus en plus fréquemment et ces dérèglements de la belle mécanique écosystémique. Nous savons ce qu'il faudrait faire pour les contenir et faire en sorte qu'elles ne s'aggravent pas. C'est parce que l'inertie de l'océan nous protège de certains des excès du changement climatique que ce changement est installé pour longtemps. Cela peut nous effrayer, mais c'est aussi du temps qui nous est donné pour nous adapter et réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Il est encore temps d'agir et il est indispensable d'agir, pour maintenir un climat viable et pour continuer à bénéficier des multiples contributions d'un océan en bonne santé. X

LES PAYS CÔTIERS EN DÉVELOPPEMENT FACE AUX CHANGEMENTS GLOBAUX



MARINE HERRMANN (X98)
conseillère scientifique de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) autour des enjeux Littoral et Océan, directrice de recherche IRD au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS)



YVES MOREL (X87)
ancien ingénieur du Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM), directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS)

Les socio-écosystèmes côtiers se trouvent en première ligne face aux effets des aléas et dérèglements climatiques. Or une fraction de plus en plus importante de la population mondiale vit sur les côtes, notamment dans les pays en développement. Et les menaces qui pèsent sur ces systèmes sont multiples. Il faut donc construire des solutions adaptées à chaque situation locale et les construire en associant les populations concernées. La France, *via* son Institut de recherche pour le développement (IRD), mène un ambitieux programme de formation des acteurs locaux, pour qu'ils prennent en charge le destin commun.

Les écosystèmes côtiers de la bande tropicale, où se situent la plupart des pays en développement, jouent un rôle majeur sur l'atténuation des effets du changement climatique : lagunes, mangroves, herbiers marins et marais salants représentent des protections naturelles contre l'élévation du niveau

marin induite par la marée, les vagues, les tempêtes et cyclones et le changement climatique. Leur préservation représente donc un objectif non seulement environnemental mais également social, majeur.

Les sociétés côtières

Les sociétés côtières, dont 80 % se situent dans un pays en développement, vivent en effet de l'océan (aquaculture, pêche, tourisme...) et en subissent les humeurs (surcotes, tempêtes, érosion, tsunamis...). Leur situation géographique rend ces socio-écosystèmes côtiers particulièrement vulnérables aux aléas climatiques à différentes échelles temporelles, des événements extrêmes comme les cyclones tropicaux aux variations interannuelles auxquelles se produisent les épisodes El Niño. Le changement climatique s'ajoute à ces menaces et les accentue : montée du niveau de la mer, bouleversement du cycle de l'eau et intensification des extrêmes (précipitations intenses, inondations, sécheresses), réchauffement et acidification des eaux qui affectent les écosystèmes côtiers et coralliens et les ressources halieutiques. En 2015-2016, la combinaison des effets à long terme du changement climatique et de l'oscillation ENSO a ainsi provoqué l'épisode El Niño le plus dévastateur ayant été observé :



← Pollution du littoral sénégalais.

de nombreux pays d'Asie et d'Amérique du Sud, d'Afrique et du Pacifique ont été frappés par des sécheresses et canicules continentales et marines exceptionnelles qui ont, entre autres, induit le blanchiment de nombreux écosystèmes coralliens, aggravé les intrusions salines et provoqué une perte significative des terres arables dans les régions deltaïques (25 % dans le delta du Mékong), entraînant des famines qui ont touché plus de 60 millions de personnes dans les pays en développement, qui représentent la population la plus vulnérable aux impacts du changement climatique.

Une menace parmi d'autres

Ce tableau pessimiste n'est pas la seule menace qui pèse sur ces populations, ni même la priorité pour les questions liées à une exploitation durable. En effet, la concentration des personnes dans des agglomérations côtières, se situant en général proches d'une ressource en eau potable, donc à proximité d'un estuaire ou d'une lagune, ne fait que croître. Actuellement, plus de 50 % de la population mondiale vit à moins de 150 km des côtes, en grande partie dans des régions ne dépassant pas 10 mètres d'altitude, et les prévisions démographiques suggèrent que la proportion pourrait atteindre 75 % d'ici 2035. Cette pression anthropique affecte de façon immédiate le fonctionnement et la santé des socio-écosystèmes des zones côtières continentales (estuaires, lagunes, mangroves) et de l'océan côtier et global, présentant des défis majeurs : déforestation (en particulier des mangroves), destruction des habitats et des écosystèmes, surexploitation des ressources, industrialisation, pollutions, gestion

déficiente des déchets, des sols et des littoraux. Ainsi, à l'échelle décennale, l'affaissement d'une grande partie des grands deltas de la planète (Nil, Mékong, Yangtsé...) est induit principalement par la construction de barrages et l'extraction de sable (qui sert à construire les gratte-ciels des grandes mégapoles et réduit considérablement les apports de sédiments aux deltas), le pompage des nappes phréatiques et le poids des mégapoles (Bangkok, Jakarta, Bombay, Manille...). Les habitants de ces deltas, citadins et paysans, voient se multiplier les inondations qui paralysent les villes et salinisent les aquifères et les ressources en eau ainsi que les terres arables, les rendant impropres à l'agriculture pour des années. Accentuées par les effets des aménagements littoraux ou des barrages qui modifient drastiquement les flux de sédiments, ces actions engendrent également une forte érosion côtière, qui cause des dégâts majeurs sur certaines infrastructures littorales. La montée des eaux induite par le changement climatique aggravera largement ces effets au cours du ^{xxi}e siècle.

Des situations locales très variées

Les pays en développement ne disposent pas de ressources comparables à celles des pays riches pour mettre en place des mesures d'adaptation et de mitigation, ni pour résister aux pressions économiques émanant d'acteurs peu regardants sur l'impact environnemental. En outre, les systèmes politiques autoritaires et la corruption qui règnent dans certains pays mettent à mal d'éventuelles politiques environnementales et renforcent encore les effets négatifs des changements globaux. Il existe cependant une →

Pêche artisanale
au filet épervier
sur la lagune Nokoué.
La lagune Nokoué,
située sur le littoral
du Bénin et alimentée
par l'Ouémé et la Sô,
est une des lagunes
les plus productives
d'Afrique de l'Ouest.



© IRD – François Trémège

Développement contre environnement ?

Au Bénin, dans la lagune Nokoué, 12 000 pêcheurs font vivre une économie qui subvient aux besoins de plusieurs dizaines de milliers de personnes, mais a un impact avéré sur les ressources : même si chacun n'extraît en moyenne que 3 kg de poisson par jour, on observe une diminution importante de la taille des poissons dans la lagune à mesure que la population s'accroît. Dans la région du bas Mékong au Cambodge, la poldérisation des deltas visant initialement à passer d'une à deux voire trois récoltes annuelles de riz appauvrit en fait à terme les terres, favorisant l'utilisation croissante d'intrants chimiques qui accentue encore le problème. Au Vietnam, les facteurs de la croissance, qui a dépassé 8 % en 2022, sont certes synonymes d'une amélioration spectaculaire des conditions de vie de la population depuis l'ouverture du pays à la fin des années 1990, mais ils ont comme ailleurs des revers négatifs : industrie textile et pollution aux microplastiques des eaux fluviales et côtières, essor du tourisme et bétonisation du littoral, utilisation intensive du charbon et pollution aux particules fines avec des conséquences qui vont de la hausse des maladies respiratoires à l'acidification des eaux côtières. De plus, ces populations, dont l'installation reste incontrôlée, sont à la merci des aléas climatiques, comme les crues dévastatrices qui deviennent systématiques en Afrique tropicale. En 2010, la crue de l'Ouémé, principal affluent de la lagune Nokoué (Bénin), a provoqué une centaine de morts, le déplacement de 700 000 personnes, la destruction de plus de 55 000 habitations et la perte de 128 000 hectares de cultures et de 81 000 têtes de bétail.

→ multiplicité de situations économiques, sociales et politiques, associées à des problèmes tout aussi multiples : un pays émergent comme l'Afrique du Sud fait certes face à des problèmes de corruption et d'inégalités sociales, mais il est malgré tout doté d'un système éducatif, de compétences, d'infrastructures, de moyens financiers et d'une stabilité politique dont sont complètement dépourvus les pays les moins avancés comme Madagascar ou Haïti.

Un équilibre à trouver

Afin de préserver et garantir l'habitabilité des socio-écosystèmes côtiers des pays du Sud, de nombreuses actions visent à élaborer des solutions aux problèmes induits par ces changements locaux et globaux. Ces actions, dont les résultats sont extrêmement variables, font intervenir une myriade d'acteurs, d'approches et d'outils : collectivités locales, gouvernements, organismes publics de recherche, bailleurs de fonds, ONG, fondations, etc. L'équilibre entre l'exploitation durable de l'environnement et la nécessaire croissance économique de ces pays reste souvent compliqué à établir. La croissance économique galopante de certains pays en développement, si elle est synonyme d'amélioration

des conditions de vie (santé, éducation, alimentation, etc.), s'accompagne également d'effets négatifs sur l'environnement et les sociétés (voir encadré). On peut retrouver certains dénominateurs communs à ces différentes situations, mais il serait illusoire de chercher des solutions génériques à des problèmes toujours associés à des contextes uniques. Pour chaque socio-écosystème marin ou côtier, l'élaboration de solutions durables doit impérativement prendre en compte de façon intégrée l'ensemble des mécanismes, facteurs et acteurs qui interviennent et interagissent dans son fonctionnement, ainsi que ses spécificités, sous peine de mener à des résultats inefficaces, voire contre-productifs et déstabilisants.

Principes pour des solutions durables

S'il n'y pas de recette magique unique, il existe cependant des principes fondamentaux, s'appuyant tous sur le dialogue d'une large palette de disciplines, de savoirs, d'approches, d'outils et d'acteurs. Il faut d'abord mobiliser et faire travailler ensemble sciences environnementales, économiques, sociales et humaines, afin d'identifier et comprendre le fonctionnement de ces socio-écosystèmes et leurs spécificités, en examinant les effets des actions humaines tant sur le plan écosystémique que sur le plan sociétal. Ensuite identifier les savoirs et besoins locaux et améliorer l'appropriation et la pertinence des solutions construites en s'appuyant sur les populations locales et les incluant dès le début dans l'élaboration de ces solutions. Transmettre avant tout les compétences plutôt que des solutions toutes faites ou transposées, en formant des personnes qui deviennent des experts dans leur propre pays. Enfin évaluer l'impact des solutions mises en œuvre (ce qui est peut-être la partie la plus difficile) : comment quantifier l'impact ? quels indicateurs ? quelles échelles de temps ?

L'Institut de recherche pour le développement

Cette approche transdisciplinaire et transsectorielle de la construction de solutions durables est au cœur des missions des chercheuses et chercheurs de plusieurs organismes publics de recherche français, qui portent des projets dont le renforcement des capacités au Sud est le socle. Ainsi, avec leurs collègues et partenaires d'Afrique, d'Asie et d'Amérique du Sud, du Sénégal à l'Indonésie, des îles du Pacifique au Pérou, les scientifiques de l'IRD (Institut de recherche pour le développement) construisent des laboratoires et mènent des projets de recherche et de formation dans ces pays.

“Comprendre le fonctionnement des socio-écosystèmes côtiers complexes.”

L'objectif est de comprendre le fonctionnement de ces socio-écosystèmes côtiers complexes et d'appréhender leur réponse aux différents facteurs de variabilité d'origine naturelle et anthropique. Climatologues et anthropologues travaillent par exemple ensemble à améliorer la résilience des États insulaires du Pacifique face au changement climatique (projet Clipssa), s'appuyant de concert sur des projections climatiques numériques et sur les savoirs écologiques locaux, afin d'assurer une meilleure pertinence et une meilleure appropriation des modalités d'adaptation construites.

Le renforcement des capacités dans les pays en développement

Cette démarche s'appuie de façon essentielle sur la formation, via des programmes de masters et de doctorat adossés à des laboratoires et projets impliquant les étudiantes et étudiants de ces pays côtiers en développement. Ces jeunes scientifiques sont les futurs experts nécessaires au développement de connaissances et de solutions durables pour l'adaptation de leurs pays aux changements globaux et locaux. Des masters internationaux, cohabités par l'Université des sciences et technologies de Hanoï au Vietnam ou l'Université d'Abomey-Calavi au Bénin et des universités françaises comme l'Université de Toulouse, ont ainsi permis de former depuis 2010, pour le Vietnam et l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, des dizaines d'océanographes, physiciens et biologistes, chimistes et écologues. Ceux-ci se mobilisent aujourd'hui pour répondre aux questions socio-environnementales brûlantes de leur région. Certains sont enseignants-chercheurs au sein d'universités et d'organismes de recherche dans leur pays, en mesure de prendre la relève et d'enseigner pour ces mêmes masters ; d'autres travaillent à la mise en place de solutions permettant de faire face aux différents risques environnementaux, comme des systèmes de prévention des crues et des cyclones ou des expertises pour l'aide à l'aménagement du littoral, des estuaires et lagunes ou encore pour la préservation des écosystèmes.

Donner du temps au temps

Enfin, l'élaboration de ces solutions nécessite de travailler sur le long terme, ce que ne permettent pas forcément certains projets dotés de moyens considérables déployés en quelques années : établir un dialogue réel, fondé sur la confiance, identifier des besoins et des objectifs, construire des compétences solides et durables et évaluer l'efficacité des actions mises en place exigent d'y consacrer du temps, ingrédient essentiel et pourtant trop souvent sous-estimé. X

OBSERVER L'Océan : UNE CONQUÊTE TECHNOLOGIQUE

**JÉRÔME PAILLET (X87)**

ingénieur à l'Ifremer, directeur
du Laboratoire d'océanographie
physique et spatiale (LOPS)

**FABRICE ARDUIN (X94)**

responsable scientifique « état de mer »
pour l'Agence spatiale européenne
(ESA), directeur de recherche CNRS
au Laboratoire d'océanographie
physique et spatiale (LOPS)

**JULIETTE LAMBIN (X94)**

chefe du département Missions futures
& architecture en observation
de la Terre à l'Agence spatiale
européenne (ESA)

Le système d'observation des océans, sur le plan technique comme sur le plan de sa coordination internationale, a atteint un niveau de maturité remarquable, à l'instar de son alter ego le système d'observation météorologique. La France est parmi les leaders de cette aventure scientifique. Les progrès à venir, pour importants qu'ils puissent être, ne changeront sans doute pas radicalement ce système. Il n'en reste pas moins beaucoup à découvrir sur ce monde secret qu'est l'océan.

© Alexis Rosenfeld

Une conclusion qui se dégage des divers articles du présent dossier est que, pour agir, nous devons observer les océans, pour comprendre ce qui s'y passe et comment ils évoluent. Mais observer les océans, ce n'est pas si simple !

Observer l'océan : une activité récente

On peut mesurer assez simplement beaucoup de propriétés de la surface de la mer : température, salinité, vagues, vent, présence de glace... Ces propriétés, observées depuis des navires, longtemps ont essentiellement servi à alimenter les premiers services météorologiques. Mais, au-delà de quelques mètres de profondeur, l'océan est difficile à pénétrer et est longtemps resté un mystère. Pour résumer, jusqu'en 1950 on ne savait pratiquement rien des propriétés de l'océan en dessous de sa surface. Les seules données de température et de salinité dans l'intérieur de l'océan provenaient d'explorations pionnières, qui étaient encore assimilables à des aventures scientifiques et humaines. Les progrès ont alors été extrêmement rapides, puisque aujourd'hui l'océan est observé, mesuré en continu par des dizaines de satellites, des milliers de sondes autonomes, des centaines de mouillages fixes et permanents, et périodiquement sillonné par des navires océanographiques le long de radiales répétitives.

Un parallèle avec la conquête spatiale

La mise en place d'un système d'observation permanent et pérenne de l'océan n'est pas sans rappeler la conquête spatiale, à la fois par des similitudes de calendrier, par les développements technologiques qui ont été nécessaires à chaque étape et par l'intense coopération internationale qui a été à l'œuvre, bien au-delà des conflits entre blocs. Et puis l'observation de l'océan a aussi impliqué le développement de la télédétection satellitaire : donc une partie de cette aventure est elle-même spatiale. Nous allons illustrer ce propos en décrivant quelques grandes étapes de la conquête de l'observation océanique, *in situ* et par télédétection, et présenterons les sauts technologiques sous-jacents.

1958 : l'année géophysique internationale (AGI)

L'Année géophysique internationale (AGI), qui s'est déroulée officiellement de juillet 1957 à décembre 1958, a été une période de coopération scientifique mondiale visant à mieux comprendre les phénomènes géophysiques

de la Terre. Un ensemble coordonné de campagnes océanographiques ont été menées durant cette période et ont permis d'obtenir la première « photo » de l'hydrologie de l'intérieur de l'océan. Les paramètres mesurés étaient basiques, la température et la salinité, mais ils suffisaient à décrire les grands courants marins, à la fois par une approche diagnostique (par exemple : « si l'eau est très salée, c'est qu'elle vient d'un endroit où il y a de l'évaporation ») et par une approche dynamique : température et salinité permettent d'estimer la densité et la pression de l'eau de mer, qui sont reliées aux courants par les équations de la quantité de mouvement. Un ensemble de navires océanographiques de plus de dix pays, dont les USA, l'Union soviétique, le Japon, l'Australie, le Royaume-Uni, l'Allemagne et la France, a donc sillonné les océans du globe en mettant en œuvre un protocole simple : descendre par câble un châssis jusqu'au fond de l'océan et pendant la remontée, à des profondeurs prédéfinies, fermer des bouteilles et actionner des thermomètres « à retournement » (pour figer la valeur de la mesure) grâce à des messagers lestés glissant le long du câble. La salinité était ensuite mesurée par conductivité électrique, à partir de l'eau enfermée dans les bouteilles.

Années 1990 : le World Ocean Circulation Experiment (WOCE)

Un nouveau programme international d'observation coordonnée de l'hydrologie des océans a vu le jour dans les années 1980, pour une réalisation essentiellement dans les années 1990 : le programme WOCE. Le principal saut technologique entre les campagnes de l'AGI et celles de WOCE est l'avènement de la bathysonde : une sonde électronique multiparamètre connectée au navire par un câble électroporteur, qui mesure en continu température, salinité et pression. La bathysonde des années 1990 comporte toujours un ensemble de bouteilles de prélèvement, mais ces prélèvements servent désormais à analyser des propriétés chimiques complémentaires : teneur en oxygène dissous, en sels nutritifs (nitrates, phosphates, silicates), en métaux-traces, en fréons... qui sont des traceurs de la circulation océanique et de l'activité biologique. L'autre avancée majeure est la résolution spatiale des mesures : d'un sondage tous les 140 km environ, on est passé à un sondage tous les 70 km par grands fonds. Cela peut sembler un détail, mais cela a permis de capturer l'échelle spatiale des principaux tourbillons et méandres océaniques, dits de méso-échelle, qui concentrent une grande part de l'énergie des courants. Alors qu'on ne distingue pratiquement pas de variabilité de méso-échelle dans les atlas issus de l'AGI, on en voit beaucoup dans les atlas et coupes issus de WOCE. ➔

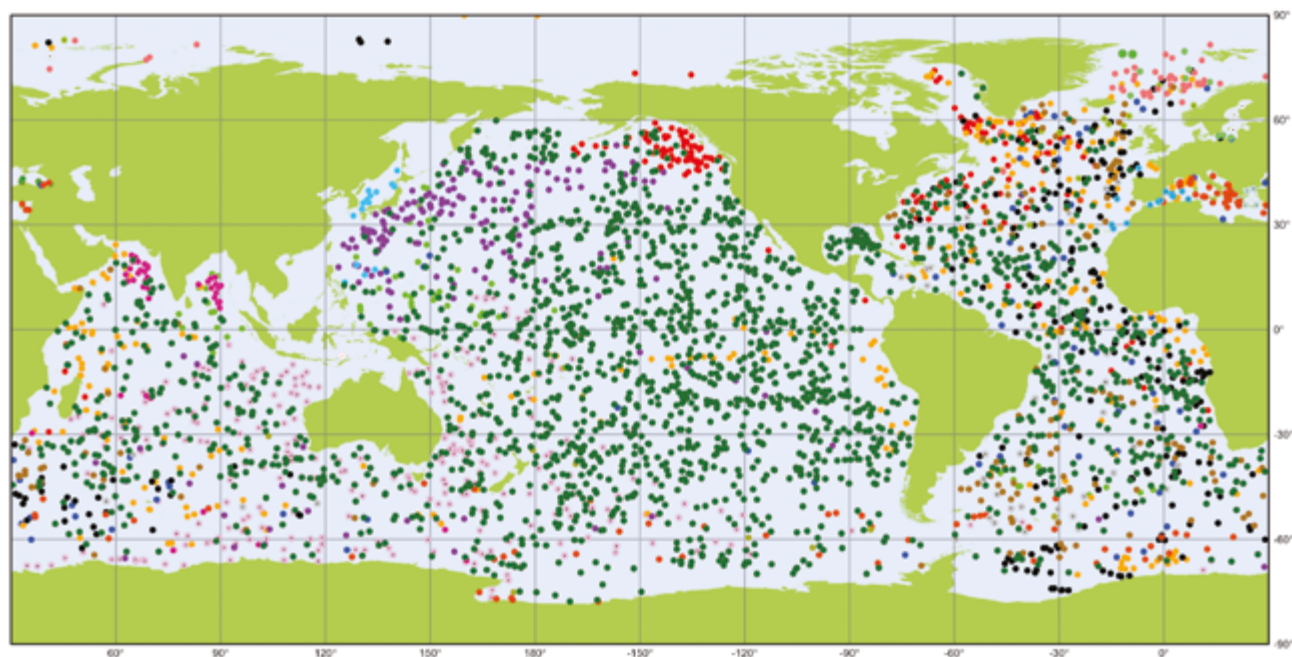
← L'astronaute Jean-François Clervoy (X78) lors d'un entraînement en mer dans le scaphandre à microgravité développé par le docteur en robotique spatiale Peter Weiss / Comex.

→ Aujourd'hui encore, il existe un programme international de campagnes océanographiques répétitives qui réalise, tous les deux à cinq ans, des séries de mesures pour la plupart commencées pendant WOCE : le programme GO-SHIP (<https://www.go-ship.org/>).

Des années 2000 à aujourd'hui : le programme Argo

Les enjeux d'observation du changement climatique dans l'océan sont devenus clairs en même temps qu'apparaissaient les premiers signaux de ce changement, à la fin des années 1990. La communauté internationale s'est mise d'accord sur un programme d'observation *in situ*, innovant et ambitieux, principalement dédié au suivi du réchauffement climatique des océans : le programme Argo (<https://argo.ucsd.edu/>). L'objectif était de déployer un réseau de flotteurs autonomes, capables d'osciller verticalement entre la surface et 2 000 m de profondeur en un cycle d'une dizaine de jours et de communiquer par satellite un profil vertical de mesures [0 – 2 000 m] tous les dix jours. Au démarrage

du programme, en 2000, de tels instruments n'existaient que sous forme de concept ou de prototype dans des laboratoires d'océanographie. Depuis 2003 environ, ils sont produits en petite série par des industriels. La cible initialement fixée de 3 000 flotteurs opérationnels en mer a été atteinte en 2007 et ce nombre est supérieur à 3 500 depuis 2012. Ces flotteurs vivent plus de cinq ans en moyenne. Aujourd'hui 21 États, plus l'Europe, sont contributeurs de ce programme, la France arrivant en deuxième position après les USA. Le réseau Argo fournit, année après année, des indicateurs du changement climatique et, en tout premier lieu, l'augmentation du contenu thermique des océans qui reflète le dérèglement du climat. Les flotteurs du réseau Argo suivent aussi la circulation de l'océan à grande échelle, et donc sa capacité à continuer à absorber la chaleur. De nouveaux flotteurs dits biogéochimiques savent désormais mesurer le pH (donc l'acidification de l'océan), les concentrations en oxygène dissous, nutriments, chlorophylle, etc., variables qui sont essentielles pour suivre la santé des écosystèmes marins.



Argo

National contributions - 3854 operational floats

November 2023

Latest location of operational floats (data distributed within the last 30 days)

• AUSTRALIA (295)	• FINLAND (4)	• INDONESIA (1)	• NEW ZEALAND (14)	• SPAIN (14)
• BULGARIA (8)	• FRANCE (301)	• IRELAND (15)	• NORWAY (45)	• UK (141)
• CANADA (169)	• GERMANY (235)	• ITALY (88)	• PERU (1)	• USA (2092)
• CHINA (56)	• GREECE (5)	• JAPAN (179)	• POLAND (9)	• OTHER (2)
• EUROPE (81)	• INDIA (43)	• NETHERLANDS (41)	• KOREA, REPUBLIC OF (15)	

Generated by ocean-ops.org, 2023-12-01
Projection: Plate Carree (-150,0000)

L'observation spatiale et l'aventure de l'altimétrie française

L'observation *in situ* est certes indispensable pour mesurer de nombreuses propriétés de l'océan mais, pour d'autres, prendre de la hauteur depuis l'orbite terrestre est beaucoup plus efficace. Par construction, l'observation satellitaire offre une couverture globale et homogène : le même instrument fait les mêmes mesures partout. Les instruments optiques ou micro-ondes passifs fournissent une mesure des champs de température de surface, de salinité de surface, et certaines mesures de biogéochimie des océans (concentration en chlorophylle, turbidité) ; les mesures actives comme le radar vont donner une sensibilité à la topographie et aux états de surface (vent de surface, vagues, courants, glaces de mer, mais aussi détection de navires, icebergs, nappes d'algues ou de polluants). La plupart de ces mesures font désormais l'objet de programmes satellitaires opérationnels garantissant acquisition systématique, distribution en temps court, continuité et contrôle qualité des données : citons notamment le programme européen Copernicus avec en particulier les satellites *Sentinel-1* (imagerie radar), *Sentinel-3* (imagerie optique et infrarouge, altimétrie) et *Sentinel-6* (altimétrie).

L'altimétrie spatiale, quésaco ?

Parmi toutes ces techniques de télédétection qui contribuent à une meilleure connaissance des océans, la communauté scientifique française, le Cnes et le secteur industriel ont particulièrement développé l'altimétrie spatiale, qui vise à mesurer la topographie de surface de la mer par satellite. Le principe en est simple : le satellite émet un bref signal radar, puis mesure le temps de retour de son écho et en déduit avec précision la distance entre le satellite et la surface de la mer. Les premiers altimètres radars, déployés en 1974 sur la station américaine habitée *Skylab*, offraient une précision de l'ordre du mètre. Les méthodes de mesure n'ont pas cessé d'évoluer en précision, et pas moins de vingt missions satellitaires, développées par les USA, la France, l'Agence spatiale européenne ou la Chine, se sont succédé sur différentes orbites depuis 1992. La série des satellites *Jason* (Nasa/Cnes/NOAA-Eumetsat) utilise un radar altimétrique Poseidon fabriqué à Toulouse par Thales Alenia Space. Ces missions sont appelées « mission de référence » car elles assurent la précision absolue la meilleure et la plus stable, une continuité parfaite d'une mission à une autre : c'est à travers ces missions que l'augmentation du niveau de la mer sur ces dernières décennies est mesurée et elles servent d'étalon à l'ensemble des autres missions d'altimétrie.

“La communauté scientifique française, le Cnes et le secteur industriel ont particulièrement développé l'altimétrie spatiale.”

Et SWOT vint...

En décembre 2022, une nouvelle révolution est apportée par la mission franco-américaine *SWOT* (*Surface Water and Ocean Topography*), développée conjointement par la Nasa et le Cnes. Le satellite *SWOT* embarque aussi un radar Poseidon-3, mais sa charge utile principale est un interféromètre radar complètement nouveau, appelé KaRIn et développé par le *Jet Propulsion Laboratory* de la Nasa en partenariat avec le Cnes et Thales Alenia Space. KaRIn permet de révéler la topographie de surface des océans sur une fauchée de 100 km de large, avec une précision verticale qui atteindra probablement quelques millimètres. Un deuxième objectif scientifique principal de la mission *SWOT* est la mesure des hauteurs des eaux continentales, rivières, lacs ou réservoirs.

Le niveau de la mer au millimètre près

La mesure du niveau de la mer a d'abord été un moyen d'étudier la Terre solide puisque, si l'on met de côté les effets dynamiques, la surface de l'eau se confond avec le géoïde (isopotentielle du champ de gravité, soit la « forme de la Terre »). Localement, la perturbation du champ de gravité par les monts sous-marins est donc détectable par une variation du niveau de la mer : ainsi, une « bosse » permanente de quelques kilomètres d'étendue est généralement associée à un mont sous-marin. Aujourd'hui la topographie mondiale des fonds marins par grands fonds est surtout connue par l'altimétrie spatiale, plus que par les campagnes de mesures par navire, et grâce à sa résolution *SWOT* va certainement révéler des milliers de monts sous-marins non répertoriés. Si l'on prend en compte maintenant les effets de dynamique de l'océan, en enlevant du signal l'effet des marées, la topographie de surface des océans va alors refléter une combinaison de phénomènes d'échelles temporelles et spatiales variées.

La circulation océanique

Elle engendre des variations de quelques mètres du niveau de la mer : pour des échelles spatiales supérieures à quelques dizaines de kilomètres, l'hypothèse géostrophique (équilibre dynamique entre le gradient de pression hydrostatique et la force de Coriolis liée à la rotation de la Terre) lie directement la topographie de surface à la dynamique interne de l'océan ; on parle de « topographie dynamique ». Comme dans l'atmosphère, où le vent tourne autour des régions de haute pression (anticyclones) et des dépressions, les courants marins tournent autour des bosses et des creux de la topographie dynamique. Ainsi, le Gulf Stream est associé à un dénivelé de la surface de la mer d'un mètre de haut, qui s'étale →



→ sur quelques dizaines de kilomètres de large. Quand le Gulf Stream faiblit, le niveau d'eau augmente sur la côte est des États-Unis, contribuant à y aggraver les inondations.



Les effets de surface

Ils sont liés aux déplacements d'eau du fait d'interactions avec l'atmosphère : les variations du vent et de la pression atmosphérique sont à l'origine de « surcotes » qui peuvent aussi contribuer aux inondations côtières. Ainsi une baisse du baromètre de 10 hPa fait monter le niveau de la mer de 10 cm, et cette surcote peut être amplifiée par les effets du vent et des vagues près de la côte.

Les variations en volume des océans

Lorsqu'on évoque la variation du niveau de la mer dans le contexte du changement climatique, c'est à ce dernier phénomène que l'on se réfère : sur l'ensemble du globe le volume des océans augmente à cause du transfert de masse d'eau des continents vers l'océan par la fonte des glaciers et calottes glaciaires, mais aussi à cause de la dilatation de l'eau directement du fait du réchauffement global. Spatialement, l'apport de masse va augmenter le niveau de la mer sur tout le globe, alors que la dilatation va augmenter le niveau dans les zones se réchauffant le plus : c'est ainsi que la montée du niveau de la mer est bien supérieure à la moyenne dans certaines zones, notamment dans le Pacifique Sud. L'altimétrie satellitaire est la principale source de données pour révéler que la vitesse de montée du niveau de la mer a dépassé les 4 mm par an et continue de s'accélérer.

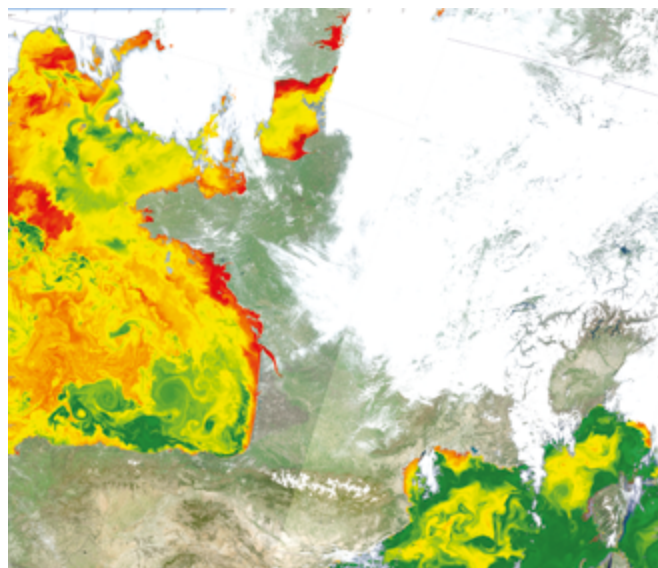
Les premières données de SWOT

La mission SWOT apporte un progrès significatif dans nos capacités d'observation altimétrique : grâce à la mesure « en fauchée » (en 2D suivant une bande sous la trace du satellite), elle va permettre d'observer le niveau de la mer avec une finesse inégalée et, entre autres choses, de mieux comprendre le rôle des tourbillons dans la circulation océanique et le transport de chaleur. Les premières mesures, encore très récentes à ce jour, sont à la hauteur des espérances : SWOT donne à voir des

↖ Ce carrousel muni de bouteilles permet de prélever à des profondeurs stratégiques des échantillons d'eau de mer qui seront ensuite analysés.

↗ Planeur sous-marin autonome équipé de capteurs de mesures. © IRD - Christophe Maes

➤ Image Copernicus Sentinel 3 observée par le capteur OLCI au-dessus de la France le 17/04/2023 permettant de mesurer le contenu en phytoplancton à la surface de l'océan.



Données modifiées Copernicus Sentinel-3 2023, source <https://ovioceandatalab.com>

phénomènes jusqu'alors peu ou mal observés, comme les ondes internes, les structures de sous-méso-échelle, la dynamique des zones côtières. Les échos de SWOT sur la glace de mer permettront aussi d'accéder, plus finement qu'aujourd'hui, à l'épaisseur de la banquise.

Le futur de l'observation de l'océan

Les progrès technologiques ont donc été considérables dans le domaine de l'observation de l'océan durant ces dernières décennies. Mais quels sont les progrès à venir ? Dans le domaine de l'océanographie *in situ*, un objectif majeur est d'arriver à automatiser et à rendre plus sobre, énergétiquement parlant, les systèmes d'observation, tout en étendant la gamme de paramètres mesurés par chaque équipement. Argo, réseau de flotteurs-profondeurs autonomes, est un bon exemple de ce processus, mais Argo ne peut pas tout mesurer, en particulier parce que ses flotteurs dérivent au gré des courants et que leur trajectoire n'est donc pas pilotée. Actuellement, les principaux développements technologiques portent donc sur des drones sous-marins et de surface, propulsés par moteur électrique et panneaux solaires, ou à la voile, ou par l'énergie de la houle, et capables d'opérer une gamme de plus en plus étendue de capteurs.

Du côté de la télédétection satellitaire, il existe pour tous les paramètres mesurés des espoirs de gain en couverture et en résolution spatiale (comme illustré par la mission SWOT pour l'altimétrie), voire spectrale. Un autre enjeu pour les océanographes est de parvenir à mesurer le vrai courant de surface, sachant que le courant déduit des altimètres, le courant géostrophique, n'est qu'une approximation à basse fréquence et en subsurface des courants océaniques. Pour mesurer ce vrai courant de surface, plusieurs techniques sont encore à l'étude, fondées sur une mesure précise de la vitesse des vagues, elle-même sensible au courant de surface : mesure par radar Doppler, par interférométrie radar ou par optique à haute résolution temporelle. ✕

SUR LES SEPT MERS DU MONDE : LA FLOTTE OCÉANOGRAPHIQUE FRANÇAISE



FRANÇOIS HOULLIER (X78)
PDG de l'Ifremer

La Flotte océanographique française a su développer des moyens matériels et humains qui la placent au premier plan de la recherche mondiale. Son unification lui confère un caractère singulier en Europe. Elle est lancée actuellement dans une démarche prospective dont tout l'enjeu est de dessiner ce qu'elle sera demain – ses équipes, ses moyens, ses pratiques, ses campagnes –, pour qu'elle puisse continuer de se projeter sur les sept mers du monde et permettre aux scientifiques de décrypter le fonctionnement de l'océan global.

La France s'est engagée dans le mouvement international d'observation des océans, d'abord indirectement sous l'impulsion du prince Albert I^{er} de Monaco. Ensuite par les premières campagnes océanographiques de l'un des ancêtres de l'Ifremer, l'Office scientifique et technique des pêches maritimes : principalement orientées vers l'halieutique, elles ont au départ été menées à bord de navires de la Marine nationale, de chalutiers reconvertis et du *Pourquoi pas ? IV* de Jean-Baptiste Charcot, puis grâce au *Président Théodore Tissier*, un navire dédié de 50,60 mètres, lancé en 1933. C'est à partir des années 1960 que des moyens navals plus conséquents, navires et engins sous-marins, ont été construits.

La Flotte océanographique française

Héritière de cette histoire, la Flotte océanographique française (FOF) est à la fois la plus grande infrastructure de recherche environnementale française, avec un budget annuel consolidé de plus de 80 millions d'euros, et l'une des plus importantes en Europe et dans le monde, grâce à une combinaison de moyens navals qui lui permet d'opérer depuis la côte jusqu'au grand large et depuis la surface jusqu'aux abysses, d'être présente sur toutes les façades maritimes de l'Hexagone et de se projeter dans l'Atlantique, l'océan Indien et le Pacifique. Double singularité en Europe, la Flotte est à la fois unifiée et multifonctionnelle.

L'unification

Au terme d'un long processus entamé au début des années 2010, l'unification de la FOF a abouti : en 2018, le sous-affrètement du *Marion Dufresne* par l'Institut polaire français a été repris par l'Ifremer ; parallèlement, l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et le CNRS ont transféré leurs navires océanographiques à l'Ifremer, respectivement en 2018 et 2020. Depuis 2020, la FOF est ainsi opérée par l'Ifremer et sa filiale d'armement, Genavir. Grâce à une gouvernance adaptée, elle est cependant largement ouverte à l'ensemble de la communauté scientifique française (universités, CNRS, Ifremer, IRD, Muséum national d'histoire naturelle...). Cette unification est atypique en Europe : les autres grandes flottes océanographiques nationales (Allemagne, Royaume-Uni...) sont en effet réparties, dans chaque →

→ pays, entre plusieurs établissements, ce qui leur demande un effort accru de coordination.

Des missions larges

Au-delà des campagnes de recherche scientifique qui constituent sa première raison d'être, la FOF est aussi chargée de réaliser des missions qui sont d'une autre nature : elle contribue aux formations organisées par les universités ; elle permet au Service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) de mener des campagnes au profit de la Marine nationale ; elle effectue aussi des missions orientées vers l'appui aux politiques publiques ou alors dans le cadre de partenariat avec des entreprises. Elle est parfois ponctuellement impliquée dans des opérations exceptionnelles de secours : cela a été le cas, malheureusement en vain, en juin 2023, lorsque les équipes de Genavir et de l'Ifremer se sont mobilisées, dans un temps très court, pour participer aux opérations de sauvetage du sous-marin privé *Titan* qui avait disparu à proximité de l'épave du *Titanic*.

Une communauté humaine, scientifique et technique

La première question posée à propos de la FOF concerne presque toujours ses navires, leur nombre, leur taille, leur capacité, leur théâtre de déploiement... La Flotte ne se résume cependant pas à cette dimension : les

“Double singularité en Europe, la Flotte océanographique française est à la fois unifiée et multifonctionnelle.”

instruments et engins qu'ils emportent et opèrent sont aussi essentiels. Surtout, la FOF n'existe que par les ingénieurs, techniciens, marins et logisticiens qui en ont la charge au sein de l'Ifremer et de Genavir, et pour la communauté scientifique qui l'utilise. Réparties entre l'Ifremer (programmation des missions, conception des moyens navals et développements technologiques relatifs aux systèmes embarqués ou systèmes sous-marins) et sa filiale Genavir (réalisation des campagnes océanographiques et logistique afférente, maintien en conditions opérationnelles des navires et de leurs appareils), ce sont près de cinq cents personnes qui sont engagées, à terre et en mer, dans cette très grande infrastructure de recherche. Dans la période actuelle, les deux unités technologiques de la direction de la FOF sont impliquées dans des projets de grande ampleur tels que la maîtrise d'ouvrage de la construction du navire semi-hauturier destiné à remplacer le navire côtier *Thalia* dans la Manche et dans l'Atlantique, ou la qualification du robot sous-marin autonome *Ulyx* conçu par l'Ifremer et construit en partenariat avec l'entreprise Exail.

Des moyens de surface

La FOF regroupe une panoplie de navires de recherche, d'engins sous-marins et d'équipements mobiles, qui lui donne accès à toutes les mers du globe, hors zone polaire. De 75 à 120 mètres de long, les quatre navires hauturiers polyvalents sont capables de réaliser des campagnes océanographiques pluridisciplinaires de plusieurs semaines sur tous les bassins océaniques. Ils sont complétés par un navire semi-hauturier basé en Nouvelle-Calédonie, ainsi que par quatre navires côtiers et une vedette qui sont utilisés dans la Manche, dans l'Atlantique et en Méditerranée pour des campagnes pouvant aller

UN MOUVEMENT INTERNATIONAL D'OBSERVATION

Il y a un siècle et demi, l'expédition anglaise menée à bord du navire *HMS Challenger* a marqué une étape majeure dans l'histoire de l'exploration et de l'observation de l'océan et déclenché une véritable émulation parmi les grandes nations industrielles.

D'autres pays se sont ensuite lancés dans cette aventure, d'abord en se dotant de navires océanographiques, c'est-à-dire de bateaux équipés d'instruments scientifiques et techniques destinés à observer la colonne d'eau, à cartographier les fonds marins, à recueillir des échantillons, à déployer des bouées d'observation, à conduire des pêches scientifiques... ; puis en développant de nouveaux moyens d'investigation et d'intervention, des engins sous-marins habités ou des robots téléopérés depuis le bord, des carottiers pour extraire des sédiments profonds, des équipements sismiques pour analyser la nature des fonds marins...

Dans les dernières décennies, la palette de ces moyens navals d'exploration, de reconnaissance, d'observation et d'expérimentation s'est élargie. D'abord grâce aux satellites pour l'observation spatiale de l'océan, qui nécessitent cependant des calibrations *in situ* pour lesquelles les moyens à la mer restent essentiels. Ensuite grâce à des moyens autonomes, de surface ou sous-marins (flotteurs, drones ou planeurs), déployés depuis les navires.



jusqu'à une dizaine de jours. S'y ajoutent sept petits navires de station du CNRS, répartis sur les façades maritimes métropolitaines et qui effectuent des sorties courtes.

Des moyens sous-marins

La FOF est également dotée d'un ensemble, unique en Europe, d'engins sous-marins dont certains sont capables d'opérer jusqu'à 6 000 mètres de profondeur : le sous-marin habité *Nautilus* lancé en 1984 et le robot téléopéré *Victor 6000* mis en service en 1999, tous deux utilisés pour l'exploration des fonds marins, le prélèvement d'échantillons, l'installation d'observatoires de fond de mer... ; l'engin autonome *Ulyx* capable de mener des missions de reconnaissance et de cartographie à haute résolution. Les navires embarquent par ailleurs des appareils scientifiques dédiés : des équipements acoustiques pour sonder les fonds marins ou la colonne d'eau ; des équipements sismiques pour explorer, depuis les navires hauturiers, la croûte océanique jusqu'à plusieurs kilomètres ; des carottiers pour extraire des sédiments qui permettent notamment des reconstitutions de l'évolution du climat sur des centaines de milliers d'années.

Des milliers de scientifiques

La FOF touche une communauté scientifique large de plusieurs milliers de chercheurs, ingénieurs et techniciens. Ce sont ainsi près de 1 800 scientifiques qui embarquent chaque année sur les navires de la flotte, dont plus des deux tiers appartiennent à d'autres établissements que

↑ Membres de l'équipage et scientifiques à bord du navire océanographique *Pourquoi pas ?* au retour de la campagne Momarsat.

l'Ifremer. Cette communauté est particulièrement attentive aux performances de la FOF, qui dépendent à la fois de la nature même de ses navires, engins et équipements, et de la façon dont ils sont mis en œuvre par les équipes de Genavir. La communauté des usagers de la Flotte est aussi légitimement sensible au processus d'évaluation, sélection et programmation des campagnes : le délai entre le dépôt d'une proposition de campagne et sa réalisation peut atteindre jusqu'à cinq ans, voire plus dans la période actuelle du fait des impacts différés de la pandémie de Covid. Les données ainsi acquises sont ensuite analysées et utilisées pendant de nombreuses années. Depuis sa conception jusqu'à la pleine valorisation des données acquises, le cycle de vie d'une campagne océanographique s'étend ainsi sur un temps long de l'ordre de la dizaine d'années. Au bout du compte, ce sont environ 350 articles scientifiques qui sont publiés chaque année et qui s'appuient sur des données issues des campagnes océanographiques antérieures.

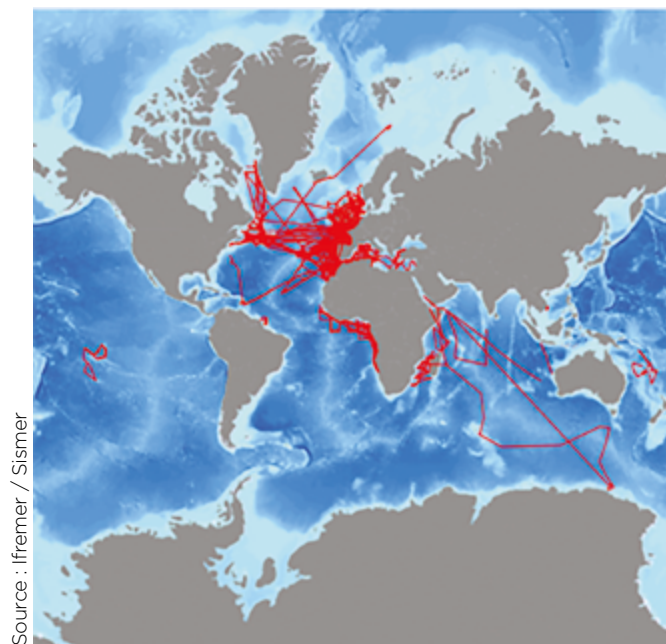
Un instrument de la souveraineté de la France

Au-delà de son importance critique pour la communauté scientifique marine, la FOF possède une dimension symbolique évidente et constitue un instrument de la souveraineté nationale dans plusieurs registres : en soutenant la mise en œuvre de politiques publiques de portée nationale, européenne ou internationale ; en garantissant la maîtrise de technologies de pointe ; en affirmant la présence scientifique de la France sur →

→ presque toutes les mers du globe. Premier exemple de politique publique à laquelle la FOF contribue : les campagnes menées chaque année à la même période dans le golfe de Gascogne, en mer Celtique, dans la Manche ou en mer du Nord collectent des données halieutiques indispensables pour suivre l'état et la dynamique des populations des principales espèces de poissons pêchées ; elles sont ainsi au cœur de la mise en œuvre de la politique commune des pêches. Dans un registre différent, les campagnes du programme Extension raisonnée du plateau continental (Extraplac) soutiennent depuis 2000 les demandes portées par la France auprès de la Commission des limites du plateau continental (CLPC) des Nations unies pour étendre ses droits souverains sur le plateau continental, au-delà de sa zone économique exclusive. Sur le fondement d'observations géologiques, morphologiques et géophysiques, les sept premières demandes validées par la CLPC ont abouti à étendre le domaine sous-marin de la France de 731 000 km² ; les cinq demandes en cours ou en attente d'examen correspondent à un potentiel d'extension additionnelle de 530 000 km².

Une souveraineté qui est aussi technologique

Le troisième exemple concerne les grands fonds marins. L'Ifremer porte pour le compte de la France deux des trente et un contrats d'exploration délivrés par l'Autorité internationale des fonds marins, l'un sur les nodules polymétalliques dans le Pacifique Est, l'autre sur les sulfures polymétalliques sur la dorsale médio-atlantique. Ces contrats supposent de réaliser régulièrement des campagnes océanographiques, non seulement pour caractériser ces environnements très profonds, leur géologie et leurs ressources minérales, mais aussi pour connaître leur biodiversité et leur fonctionnement écologique ou pour évaluer les risques que ferait courir une éventuelle exploitation de ces milieux vulnérables et peu résilients. Les données acquises dans ce cadre sont essentielles pour fonder la position de la France sur ce sujet sensible. Par ailleurs, dans un contexte marqué par une attention accrue du ministère des Armées à la maîtrise des fonds marins, par l'essor de technologies, duales, de reconnaissance et d'observation autonomes de l'océan et par le mouvement vers la décarbonation du transport maritime, la FOF contribue à la souveraineté technologique du pays. Les compétences des équipes de la FOF, le fait que leurs innovations sont systématiquement testées en conditions opérationnelles et dans des contextes variés sont ainsi des atouts pour le développement de filières industrielles.



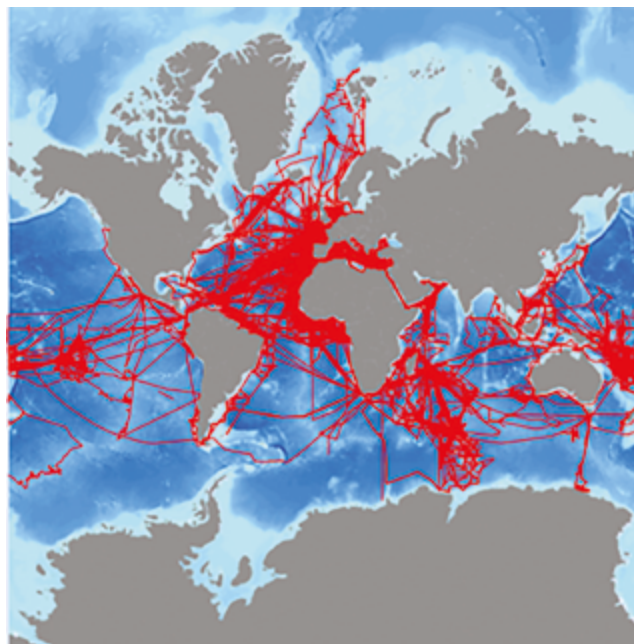
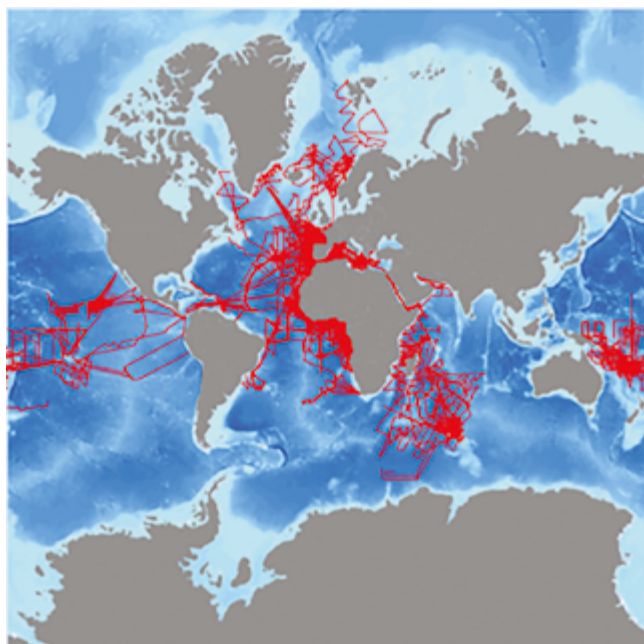
Source : Ifremer / Sismer

Une présence dans les trois grands bassins océaniques

Autre face de la FOF en matière de souveraineté, sa capacité de projection permet à la France d'affirmer sa présence dans les trois grands bassins océaniques, par exemple dans la zone indopacifique. Cette présence globale est aussi illustrée par les trois cartes présentées ci-dessus, qui permettent de suivre le déploiement des campagnes océanographiques au cours du siècle dernier ; elles donnent aussi à voir les zones d'intérêt de la communauté scientifique française, que cet intérêt soit lié à la proximité des côtes de l'Hexagone (en Méditerranée ou dans l'Atlantique) et des outre-mer ou qu'il découle de découvertes majeures. On voit ainsi apparaître, dans les années 1960-1980, l'effort d'exploration de la dorsale médio-atlantique et de la zone de Clarion-Clipperton dans le Pacifique Est. Cette carte montre aussi les zones où la FOF est peu présente, voire absente : par exemple, les zones nord et est de l'océan Indien ou les océans Arctique et Austral (par défaut de brise-glace scientifique).

L'avenir de la Flotte océanographique française

L'unification de la FOF s'est accompagnée d'une réflexion prospective qui a débouché en 2020 – c'était une première – sur une programmation décennale du renouvellement des moyens navals. Au double regard du coût (la construction d'un navire hauturier d'une centaine de mètres coûterait aujourd'hui plus de 100 M€) et de la durée de vie des navires océanographiques (une quarantaine d'années) et des équipements lourds qui leur sont liés, de tels exercices de prospective et de programmation sont indispensables. Cette program-



← Trajectoires des campagnes océanographiques qui se sont déroulées, depuis 1921, sur les navires français ou en coopération sur des navires étrangers. De gauche à droite : 1921 - 1959 ; 1960 - 1983 ; depuis 1984.

mation s'est déjà traduite par la finalisation d'actions engagées et par le lancement de nouveaux projets (modernisation en cours du robot *Victor 6000*, construction d'un navire semi-hauturier pour la Manche et l'Atlantique en 2023-2025, modernisation du *Pourquoi pas ?* en 2024-2025, décision de construire un navire semi-hauturier pour le Pacifique et l'océan Austral en remplacement de l'*Antea*).

Un exercice prospectif

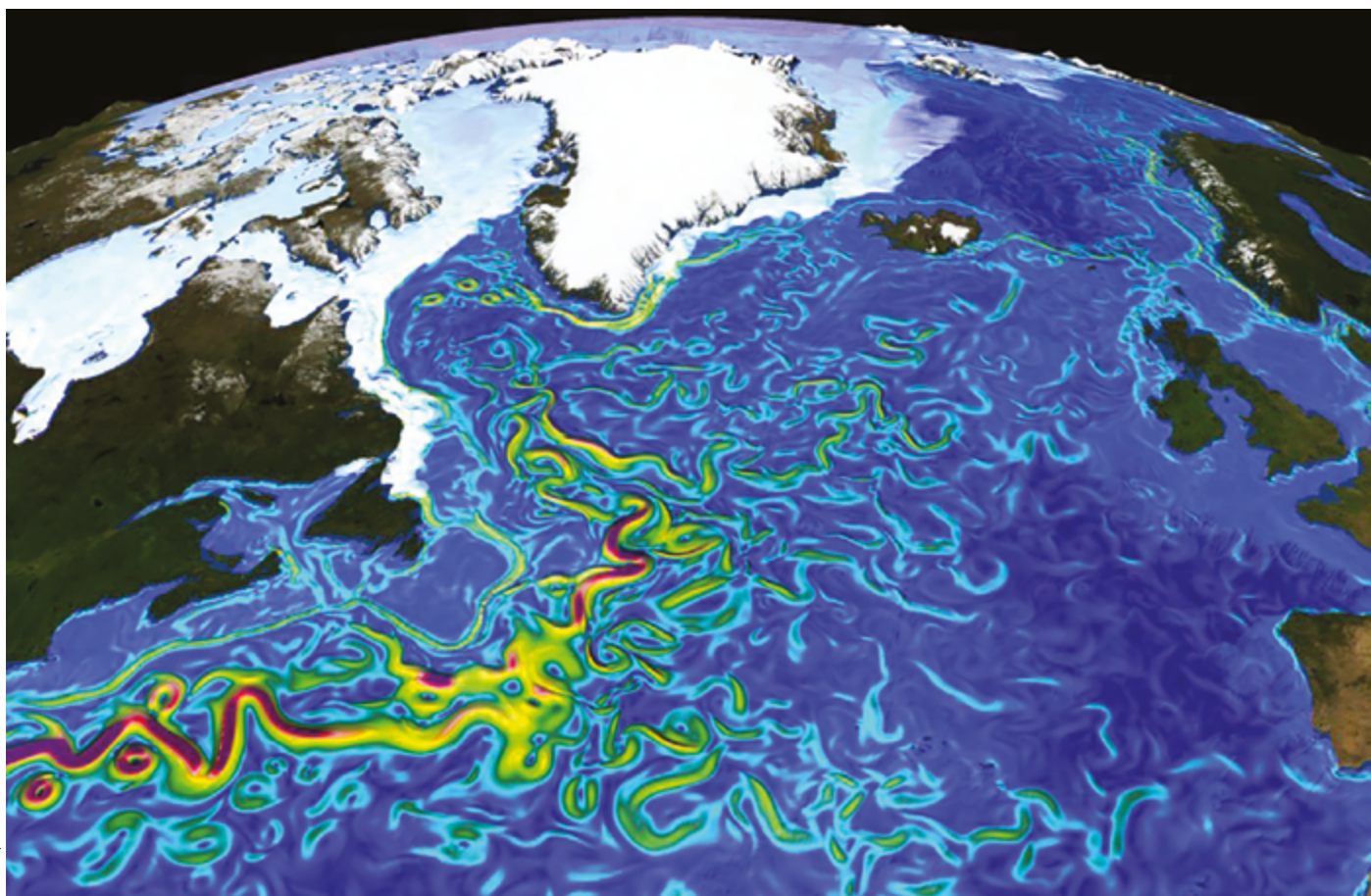
En 2023, il a été décidé de relancer un cycle de prospective et de programmation. Les raisons en sont multiples : trois des quatre navires hauturiers arrivent en fin de vie entre 2030 et 2035 ; l'essor rapide des moyens autonomes d'observation interroge sur la place qui leur sera accordée au sein de la FOF ; les programmes lancés dans le cadre du plan France2030 sont susceptibles d'accroître la demande de campagnes scientifiques ; la décarbonation du transport maritime concerne aussi les navires scientifiques.

Cette prospective s'organise autour de trois grands axes. Le premier est consacré à la science : quelles seront les principales questions en océanologie dans les prochaines décennies ? De quelles observations et données les chercheurs auront-ils besoin ? Deux exemples illustrent concrètement ce sujet : les recherches en paléoclimatologie vont-elles continuer de nécessiter de carotter les sédiments profonds ? Le suivi des populations et communautés de poissons va-t-il, à terme, reposer sur des méthodes moléculaires ? Selon les réponses à ces questions, le dimensionnement des futurs navires océanographiques pourrait être modifié. Le second axe est technologique : la montée en puissance de l'observation autonome (drones de surface ou sous-marins) va-t-

elle induire un nouvel équilibre entre ces nouveaux engins et les moyens lourds que sont les navires ? Le déploiement de la téléprésence va-t-il modifier l'organisation des campagnes en mer en favorisant les interactions en temps réel entre équipes embarquées et à terre ? Quelle sera la trajectoire de décarbonation des navires océanographiques, des campagnes et *in fine*, car c'est bien cela qui comptera, des données ?

La nécessité de partenariats

Le troisième axe est partenarial. La FOF a su organiser des formes de mutualisation, par exemple entre les besoins de la recherche et de l'appui aux politiques publiques, et nouer des partenariats en France (avec les Terres australes et antarctiques françaises et la Marine nationale) et à l'international (dispositifs d'échanges et d'accès croisés entre flottes océanographiques de différents pays). Peut-on aller plus loin dans cette direction, en Europe ou dans le monde, notamment autour des moyens les plus lourds que sont les brise-glace et les grands navires hauturiers ? À ce volet s'ajoute celui de la diversification de l'offre de moyens navals et de navires d'opportunité construits à d'autres fins que scientifiques mais qui peuvent contribuer à l'acquisition de données océanographiques : comment tirer parti d'initiatives pionnières sans déséquilibrer, économiquement ou éthiquement, le modèle d'accès à la FOF qui repose à la fois sur un financement public et sur un processus exigeant d'évaluation des campagnes proposées par les chercheurs ? Comment collaborer avec les armateurs commerciaux ou avec les plaisanciers qui sillonnent les mers et qui sont prêts à équiper leurs bateaux de capteurs potentiellement utiles à la science ? ✕



↑ Courants de surface modélisés à 8 km de résolution.

PLONGÉE NUMÉRIQUE DANS L'OcéAN DU FUTUR



PIERRE BAHUREL (X89)
directeur général de Mercator Océan



ANNE-MARIE TRÉGUIER (X79)
directrice de l'*Interdisciplinary graduate School for the blue planet (ISblue)*, directrice de recherche CNRS au Laboratoire d'océanographie physique et spatiale (LOPS)

Comme pour la météo et le climat, les capacités de simulation de l'océan se sont développées de manière incroyable depuis quelques décennies. Cela permet des prévisions inimaginables auparavant et des reconstitutions précieuses du passé. L'arrivée de l'intelligence artificielle permet d'anticiper de nouveaux développements et d'imaginer un véritable jumeau numérique de l'océan. Les capacités associées à ces développements joueront un rôle majeur dans les débats sociétaux et politiques à venir.

L'océan numérique est à l'océanographie ce que le cinéma est à la culture : une fenêtre ouverte sur notre propre monde, un autre regard, la possibilité de choisir l'histoire que l'on veut vivre et s'y immerger, explorer ce qui nous est normalement inaccessible – voyager dans le temps, voir l'invisible, être partout à la fois, explorer et apprendre, comprendre, comprendre enfin ! et ressortir plus riche en laissant derrière soi un monde intact, en sachant qu'on peut y retourner. Comme le cinéma, l'océanographie numérique est passée en quelques décennies du noir & blanc à la couleur, à la haute résolution, aux 3D, aux séries, aux formats longs. Combien de métiers mobilisés, combien d'heures de travail, combien de tentatives pour pouvoir offrir finalement à chacun cette expérience d'une immersion réaliste et fluide dans un miroir numérique de son propre monde ? Et, comme le cinéma qui sort des salles obscures, s'hybride avec les jeux vidéo, passe d'un écran à l'autre, fait du spectateur un acteur, l'océan numérique prépare un jumeau numérique de notre océan qui amène la connaissance de l'océan au creux de la main de chacun.

Les simulateurs numériques d'océan

L'océan est un fluide qui obéit aux lois de la mécanique. Son comportement peut être décrit par un système d'équations différentielles pour les variables qui le caractérisent : la température, la salinité et la vitesse des courants. Hélas, ces équations étant non linéaires, elles défient les mathématiciens depuis le XIX^e siècle et on a dû longtemps se contenter de solutions dans des cadres très idéalisés en une ou deux dimensions. L'essor de l'informatique à la fin des années 1970 a ouvert de nouveaux horizons, en rendant possibles des simulateurs numériques d'océan qui permettent de résoudre numériquement ces équations et de décrire l'océan dans toutes ses dimensions et sa complexité. Ces modèles numériques d'océan sont les héritiers des modèles d'atmosphère développés pour la prévision météo : en effet les deux fluides, air et eau, obéissent à des équations similaires, et la rotation de la Terre (force de Coriolis) joue un grand rôle dans leur dynamique. L'océan se distingue cependant de l'atmosphère par des échelles spatiales plus petites (une perturbation atmosphérique a dix fois la taille d'un tourbillon du *Gulf Stream*) et des échelles temporelles plus longues (une perturbation météo dure quelques jours, un tourbillon océanique plusieurs mois). Simuler l'océan global avec des précisions suffisantes est donc un défi considérable pour les supercalculateurs les plus puissants. On parle ici de mettre à jour toutes les deux minutes une trentaine de paramètres décrivant l'état de l'océan sur chacun des 9 milliards des

points de grille utilisée par ce superlogiciel : sur l'un des supercalculateurs du top 100 mondial, générer un an de simulation mobilise une semaine de calculs sur 30 000 processeurs et fournit un pétaoctet de données.

Pour décrire ce que l'on sait, plutôt que ce que l'on voit

C'est ébouriffant, mais en océanographie on ne s'adonne pas à la modélisation numérique pour être en phase avec son époque : on le fait depuis longtemps par nécessité et pour compenser un cruel manque d'information sur cet espace immense qu'est l'océan. Avec les moyens d'observation actuels, décrire l'océan revient à caler une prévision météo sur la France avec une image satellite, une mesure de terrain à Madrid et l'autre à Oslo ! Mieux vaut alors savoir s'organiser pour reconstituer l'information qui manque, et c'est exactement le rôle de cette océanographie numérique : interpoler, extrapoler, reconstituer la turbulence et les grands équilibres à partir des indices laissés par les observations, des règles inviolables de la mécanique des fluides et de la mémoire de nos systèmes. Finalement, redessiner un océan dans toutes ses dimensions, à partir de *ce que l'on sait*, ce qui est bien plus riche que ce que l'on voit. Cette océanographie a fait d'immenses progrès en vingt ans et il est donc possible aujourd'hui de décrire numériquement l'océan sur l'ensemble du globe comme il est possible de zoomer sur un lieu choisi, de rester en surface ou de plonger dans les grandes profondeurs, remonter plusieurs décennies en arrière ou se projeter sur l'avenir, et choisir dans quelles nuances décliner son état – courants ou oxygène, concentration de glace ou CO₂ dissous, température ou salinité, vagues ou chlorophylle... – ou plutôt tout cela à la fois, de façon cohérente dans l'espace, dans le temps et pour une trentaine de paramètres qui se répondent dans le respect des grands équilibres naturels que la science avait donc compris avant l'informatique. Mais nous y sommes aujourd'hui et l'océanographie numérique est une pièce maîtresse de notre connaissance.

Quel océan fera-t-il le mois prochain ?

C'est l'une des premières applications d'un océan numérique : décrire l'océan qu'il fait, aujourd'hui ou dans quelques semaines (les océanographes ont aussi leurs prévisionnistes), tout autour du globe, en surface comme en profondeur. Et pouvoir également revenir en arrière pour rejouer des situations vécues sur les dernières décennies, en déduire les tendances et apprécier la normalité ou l'anormalité d'un événement. On peut remonter plus loin, mais les trente dernières années constituent ici une période de référence du fait de données satellites de grande précision sur lesquelles les →

—> modèles numériques peuvent s'appuyer pour coller à la réalité. Dans ce domaine du temps proche, les observations jouent un effet un rôle clé et l'art (que l'on appelle l'assimilation de données) consistant à intégrer harmonieusement information observée et information modélisée est un art majeur. Grâce à cette combinaison, les simulateurs d'océan accèdent à une description opérationnelle très réaliste, y compris à des échelles fines : au grand large, les méandres et tourbillons sont décrits avec un maillage de 2-3 kilomètres et l'on descend à quelques centaines de mètres avec des systèmes locaux. Parmi les exigences qui sont devenues légitimes, on pourra citer le fait de prévoir : l'évolution des courants sur la verticale de sa plateforme de travail en mer, les extrêmes saisonniers de température modélisés sur les dix ans passés pour le lieu d'implantation de sa ferme aquacole, les évolutions des interactions houle-courants sur la trajectoire prévue d'un navire, les conditions actuelles de propagation acoustique du bruit sous-marin ou la quantité de chaleur disponible dans les cent premiers mètres de l'océan quand un cyclone (qui se nourrit de cette énergie) menace d'incurver sa course... Les systèmes opérationnels de modélisation et prévision océaniques savent y répondre (voir par exemple <https://www.mercator-ocean.eu/bulletin/>). Nous pouvons naviguer dans les quatre dimensions d'un océan numérique depuis la fin du siècle dernier jusqu'à aujourd'hui et poursuivre sur notre élan pendant quelques semaines avec grande précision. C'est déjà extraordinaire, mais le sujet ne s'arrête pas là.

Quel océan à la fin du siècle ?

Pour se projeter vers un climat futur, simuler l'océan comme un simple milieu liquide ne suffit pas : il faut prendre en compte toutes les interactions au sein du système océan et autour de lui. Dans les modèles dits du système Terre réalisés en soutien aux travaux du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat), l'océan numérique est couplé à un modèle d'atmosphère : à la surface, l'eau et l'air échangent à chaque instant et en chaque point de la chaleur, de la quantité de mouvement, de l'eau qui s'évapore ou tombe en pluie et des composés chimiques divers. L'océan est aussi couplé à un modèle de glace de mer pour prendre en compte la fonte de la banquise arctique, à un modèle d'apports fluviaux, à un modèle biogéochimique pour simuler la pompe biologique de carbone et depuis peu à un modèle de plateforme glaciaire pour simuler le retrait des glaciers de l'Antarctique. Cette simulation de la complexité de l'océan est rendue possible par le travail des modélisateurs des différentes composantes du système et aussi par des efforts de développement des couplages, aussi bien en analyse numérique qu'en informatique. Sur le sujet particulièrement critique de la montée du niveau de la

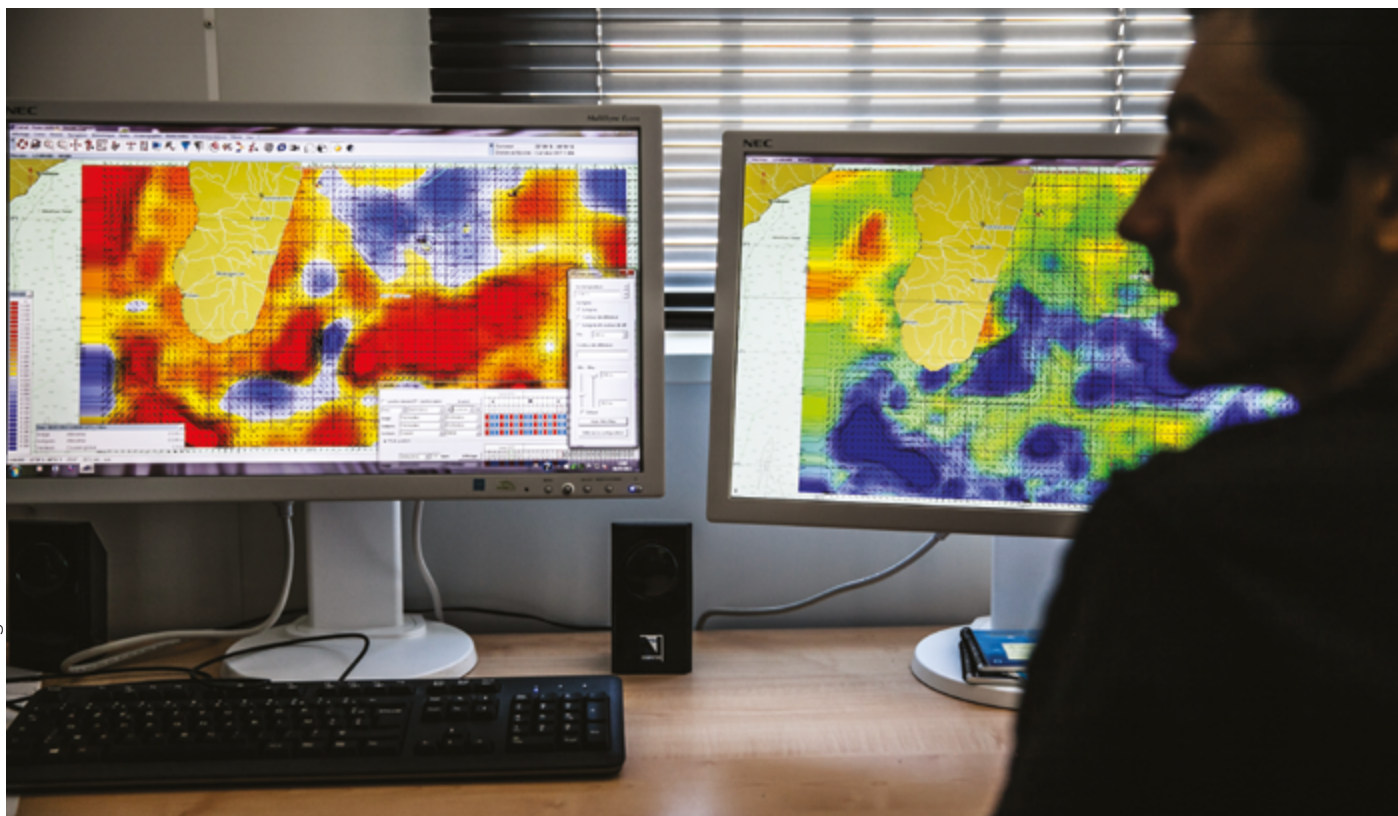
mer, les projections requièrent toute une chaîne de modèles numériques : un modèle d'océan global pour la dilatation de l'océan, des modèles de la croûte terrestre pour les mouvements verticaux des continents et pour les effets locaux d'affaissement du sol, des modèles de calottes glaciaires et de glaciers continentaux, des modèles d'élévation extrême du niveau de la mer due aux tempêtes et à la houle. Pour fournir une information pertinente aux décideurs, les incertitudes sont quantifiées tout au long de ces chaînes de modélisation complexe. Cette information est cruciale quand il s'agit d'infrastructures portuaires et côtières d'une durée de vie de plusieurs décennies, ou pour guider la décision d'abandonner une ville côtière (comme c'est le cas pour Jakarta en Indonésie).

Une révolution en marche

L'intelligence artificielle (IA) vient en force bouleverser les sciences et la simulation océanique se prépare à une révolution. Tous les simulateurs d'océan actuels sont fondés sur la discrétisation des équations de la mécanique des fluides et leur résolution par des méthodes numériques éprouvées (volumes finis, éléments finis...). L'intelligence artificielle va profondément modifier ce paysage. Dans un premier temps, l'IA est attendue pour améliorer la fidélité des modèles et leur efficacité, en représentant mieux les processus non résolus par les modèles. Les méthodes d'apprentissage informées par la physique, ou l'apprentissage d'équations, sont mises à profit dans ce cadre. Dans le futur, des services fondés sur l'IA vont se développer, une évolution que nous voyons aujourd'hui poindre dans le domaine de la prévision météorologique. L'IA construira sur ce socle des services plus variés et mieux adaptés aux besoins des décideurs : au-delà de l'amélioration des grands modèles de simulation de l'océan, on attend des changements dans la science des produits, c'est-à-dire celle qui crée l'information juste pour l'utilisateur à partir de la matière première créée par ces grands systèmes de modélisation. Pour fournir des services fiables l'IA nécessitera des bases d'apprentissage solides qu'elle trouvera – c'est là que ces approches intégrées prennent toute leur force – dans la richesse d'information des grandes simulations, des réanalyses océaniques et des projections fondées sur les lois de la physique et de la chimie.

Vers un jumeau numérique de l'océan

Depuis une décennie, l'horizon temporel de la prévision océanique s'étend et la résolution spatiale des composantes océaniques des modèles de climat s'affine. Cette convergence, permise par les progrès des moyens de calcul et des performances logicielles des simulateurs



d'océan, aboutit à un simulateur d'océan capable de traiter différentes échelles d'espace et de temps dans un système unique qui répondra mieux aux besoins de la société, depuis la sécurité des moyens en mer jusqu'aux projections de modifications des zones de pêche dans le climat plus chaud des prochaines décennies. Et, dès lors qu'on approche d'une description réaliste de l'environnement physique et biogéochimique de l'océan, que nous sommes satisfaits de ses interactions avec les éléments voisins du système Terre : la cryosphère, l'atmosphère et les continents, que la modélisation de cet océan à l'état naturel nous convient, il reste à rajouter la vie, c'est-à-dire monter une à une les marches de la chaîne trophique jusqu'aux grands animaux marins pour les inclure dans ces simulateurs, mais aussi, et c'est moins drôle, l'influence de l'homme. Il s'agit non seulement du CO₂ en excès d'origine humaine, mais encore des navires et du bruit qu'ils font ou de la pollution apportée par les fleuves. On approche alors d'un « jumeau numérique de l'océan » : une forme travaillée pour reproduire les conditions du réel, pas seulement par une précision scientifique la plus élevée possible mais aussi par la volonté d'agréger, combiner et coupler toutes les informations utiles pour un exercice de réalité virtuelle marine digne du meilleur jeu vidéo. Car l'objectif n'est pas la séance passive de cinéma, mais bien de permettre l'interactivité et de faire de chacun un acteur de cette histoire océan. Un jumeau numérique de l'océan (voir la vidéo : <https://youtu.be/SgnaEoYS8Fo> ou <https://www.mercator-ocean.eu/digital-twin-ocean/>), c'est donc tout à la fois un simulateur d'océan le plus représentatif

possible de la réalité qui nous préoccupe et un ensemble d'outils pour appréhender celle-ci. Jouer au jeu du « et si ? » : et, si je réduisais telle pollution, quel serait l'impact sur cet écosystème dans un an ? Ne plus jouer : se trouver virtuellement immergé au milieu d'une forêt de corail et pouvoir se projeter dans un monde à 1,5 °C, puis dans un monde à + 3 °C. Et comprendre.

Encore une raison de s'y intéresser

Partons de là : un jumeau numérique de l'océan se nourrit de ce que la science sait nous dire. Mais c'est aussi une voie nouvelle qu'on ouvre pour que chacun accède à cette connaissance et l'enrichisse d'expériences, et c'est une voie sur laquelle on compte. Car les outils numériques sont destinés aux décideurs, dans le but d'évaluer si leurs actions tempéreront ou aggraveront la situation. Dans un avenir où les crises environnementales vont se succéder, les mesures pour en limiter les impacts seront de plus en plus contraignantes et contrariantes, et vont s'inviter dans des débats sociétaux, économiques ou géopolitiques avec plus de force qu'aujourd'hui. Une information fiable sur l'état de l'océan, la capacité de rejouer telle situation ou d'en prévoir une autre, prendra une valeur nouvelle. La capacité à garantir l'intégrité de cette information sur l'océan déterminant la décision opérationnelle deviendra réellement critique. Les investissements consentis pour l'océan aujourd'hui en France et dans le monde pour maintenir une connaissance scientifique au meilleur niveau et pour de grandes infrastructures numériques de création et partage de connaissance sont donc déterminants. X

“Les outils numériques sont destinés aux décideurs, dans le but d'évaluer si leurs actions tempéreront ou aggraveront la situation.”

UN Océan DE SOLUTIONS ?



OLIVIER LAROUSSINIE (X83)
directeur délégué pour la planification maritime à la Direction technique risques-eau-mer du Centre d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA)



FRANÇOIS GAUTHIEZ (X87)
directeur de l'appui aux stratégies pour la biodiversité de l'Office français de la biodiversité (OFB)

Face aux défis posés par le changement climatique, par l'alimentation des milliards d'êtres humains ou encore par l'économie mondialisée, l'océan se situe au cœur des questions. Les solutions qu'il nous offre sont nombreuses : source d'énergie renouvelable, minerais pour l'industrie de demain, ressources halieutiques, transport à bon marché, stockage de carbone, source de molécules pour les biotechnologies, sans compter l'attrait pour les zones côtières et leurs fonctions récréatives. Un certain enthousiasme est de mise. Pourtant les messages d'alerte sont tout aussi nombreux. L'impact des activités humaines, la surexploitation des ressources, les pollutions (notamment par le plastique), l'élévation du niveau de la mer ou encore l'augmentation des événements extrêmes incitent à un discours plus prudent. L'océan est indéniablement une source de solutions, mais il n'est pas inépuisable.



Photothèque du Cerema

La transition énergétique qui est à l'œuvre demande de développer rapidement la production d'électricité et l'électrification de ce qui est encore dépendant des hydrocarbures. Du côté de la mer, le potentiel d'énergies renouvelables paraît à la hauteur de l'enjeu : marées, houle, courants, vent, énergie thermique, toutes les pistes sont explorées. Néanmoins, la seule qui soit exploitable avec une technologie mature et à l'échelle de production souhaitée est pour l'instant l'éolien.

L'océan, ressource pour la transition énergétique

Les objectifs français sont de 18 GW de puissance installée en 2030 et de 40 GW en 2050. Au niveau européen les objectifs sont respectivement de 60 GW et 340 GW. Paradoxalement, la France n'est pas la mieux placée, malgré l'importance de son domaine maritime. Pour l'éolien posé (la machine repose sur des fondations), la profondeur peut difficilement dépasser 50 m. Si l'on ajoute le souhait d'éloigner les fermes éoliennes de la côte, le potentiel est essentiellement dans la Manche (pour l'Europe, en mer du Nord). L'éolien flottant (la machine repose sur un flotteur ancré), en phase de développement industriel, élargit le potentiel au plateau



← Installation d'une ferme éolienne offshore.

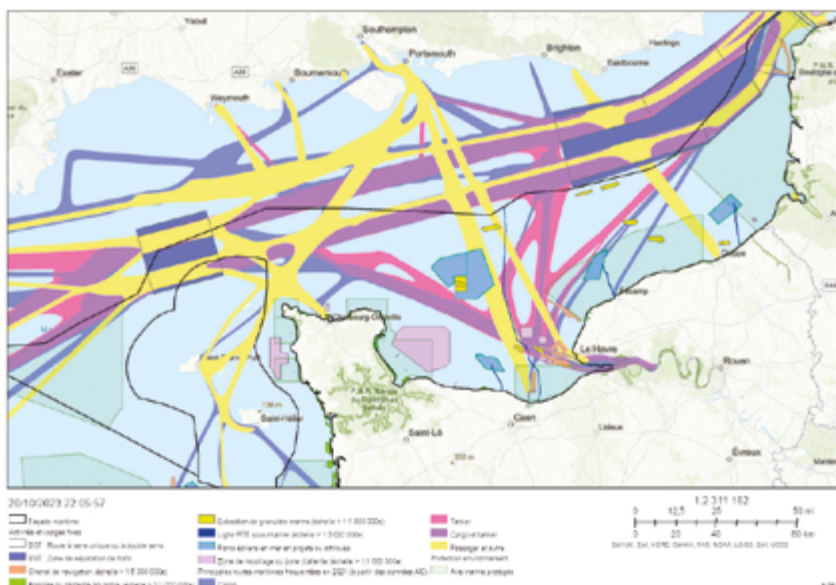
installées, dont la taille dépasse largement celle des éoliennes terrestres. Les ports sont donc particulièrement sollicités pour accompagner ces investissements. Les zones industrialo-portuaires sont même considérées comme des lieux privilégiés pour accueillir les industries de la transition écologique (Marseille et Dunkerque par exemple se positionnent comme hub pour l'hydrogène décarboné). Si nous tirons un peu plus le fil, la transition énergétique c'est aussi une question de minerais et de terres rares, qui font regarder vers les ressources existantes dans les grands fonds marins. Mais des inquiétudes sérieuses concernant l'impact d'une exploitation minière dans les abysses rendent cette perspective controversée au niveau international : la France a d'ailleurs pris position en faveur d'un moratoire sur l'exploration minière dans les grands fonds.

Une vaste voie de communication

Le transport maritime est donné pour véhiculer 80 % du commerce international, à un prix modéré qui a permis les concentrations et spécialisations réparties à travers la planète et la mondialisation qui en résulte. Le propos n'est pas ici de juger des bénéfices de celle-ci. La possibilité du transport maritime est de fait un atout, mais il a lui aussi des impacts non négligeables sur l'environnement : pollution aux oxydes d'azote et de soufre, microparticules, émission de gaz à effet de serre, collisions avec les mammifères marins, vecteurs d'espèces exotiques envahissantes. L'organisation maritime internationale a déjà mis en place de nombreuses mesures pour les limiter, par exemple des règles sur les émissions polluantes ou des zones maritimes particulièrement vulnérables dans lesquelles une réglementation spéciale est édictée. L'objectif majeur est sans doute sa décarbonation, dont l'objectif est affiché, mais qui reste lointain. L'espoir est néanmoins de mise, de nombreuses initiatives ont vu le jour, par exemple sur le recours à la propulsion d'appoint par le vent et, pourquoi pas ? pour le retour à des cargos à voile, de taille modeste pour l'instant (par exemple les armateurs Grain de Sail et TOWT, TransOceanic Wind Transport).

Une mer nourricière ?

Comme l'indique l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), la production halieutique et aquacole continue d'augmenter et dépasse désormais 210 millions de tonnes ; un accroissement deux fois plus rapide que celui de la population →



continental, c'est-à-dire en pratique dans le golfe de Gascogne et le golfe du Lion. Les outre-mer, pour l'instant, sont handicapées par le risque cyclonique ou un relatif isolement par rapport aux bases industrielles possibles. Des infrastructures portuaires et industrielles sont en effet nécessaires pour assurer la construction et l'entretien des centaines de machines qui vont être

↑ Surfréquentation de l'espace maritime : carte issue du visualiseur d'information géographique de Géolittoral (ArcGIS Web Application : smart-origin.com)

→ mondiale depuis les années 1960. La production mondiale de la pêche maritime plafonne, elle, depuis les années 1980 (autour de 90 millions de tonnes). La FAO estime qu'elle pourrait encore augmenter, durablement, en mettant fin à la surexploitation de certaines ressources. Celle-ci progresse malheureusement depuis les années 1970 sur le plan mondial. Les situations sont toutefois très contrastées d'une région à l'autre.

Les pêches maritimes

En Europe et en France, la gestion des pêches maritimes a connu des changements radicaux au début des années 2000, avec des conséquences positives. Au niveau de l'UE, le point essentiel est la fin des subventions à la construction de navires actée en 2002. En France, la politique de contrôle des pêches s'est enfin affirmée au milieu des années 2000 sous l'effet d'un contentieux européen particulièrement lourd. Parallèlement, la gestion des quotas de pêche s'est enfin précisée, rompant avec les règles antérieures qui entretenaient la « course au poisson ». Ainsi, depuis le milieu des années 2000, la pression de pêche diminue continuellement sur les ressources exploitées par les navires français en Atlantique. La biomasse de thon rouge de l'Atlantique Est et de Méditerranée a triplé, signe de la bonne marche d'un plan de reconstitution international où la France tient une part importante. Ces réussites ne doivent pas masquer la persistance de difficultés majeures comme la forte surexploitation des ressources de fond en Méditerranée, les impacts de la pêche sur les mammifères marins en Atlantique ou les effets du chalutage sur les habitats benthiques. Au niveau mondial, les carences de la gouvernance dans certaines zones offrent un terrain favorable à la pêche illégale, notamment dans les eaux internationales.

L'aquaculture

Si la pêche plafonne, l'aquaculture, elle, progresse dans des proportions colossales sur le plan mondial, avec de fortes préoccupations quant à son impact environnemental. En France, la conchyliculture est bien implantée dans les bassins historiques, mais reste très dépendante de la qualité physico-chimique ou biologique des eaux, que ne maîtrisent évidemment pas les producteurs. La pisciculture marine, de son côté, est confrontée en France à la difficulté récurrente d'accès à l'espace et cherche des solutions nouvelles, par exemple en profitant des espaces dédiés à l'éolien en mer ou encore en pariant sur l'aquaculture multi-trophique intégrée (AMTI) qui est susceptible de réduire l'empreinte environnementale de l'activité.

“En France la Stratégie nationale pour la mer et le littoral donne un cadre général de planification.”

La planification de l'espace maritime

Puisque la mer est de plus en plus sollicitée, les conflits d'usage sont de plus en plus nombreux. L'éolien en est un bon exemple et un sujet particulièrement vif au moment de chercher l'emplacement des futurs 40 GW. L'installation d'une ferme éolienne va constituer un obstacle au trafic maritime, être incompatible avec une pêche au chalut (métier très largement majoritaire au sein de la flotte française), provoquer des désagréments paysagers si elle est trop proche de la côte. À l'inverse, elle-même ne pourra pas être installée dans certaines zones de Défense nationale, elle ne doit pas perturber les moyens de surveillance radar et doit se tenir à l'écart des rails de navigation. Elle doit également éviter les

impacts sur l'environnement, en particulier les zones sensibles pour l'avifaune. De façon générale, l'idée qu'une planification de l'espace maritime est nécessaire s'est développée depuis une quinzaine d'années, au niveau international notamment avec des travaux de la Commission océanographique internationale à l'Unesco, puis au niveau européen avec l'adoption d'une directive en 2014. Elle vise autant à donner de la visibilité

aux investisseurs et à faciliter le développement des activités qu'à minimiser les impacts sur le milieu marin.

Comment planifier ?

En localisant les enjeux pour l'environnement et pour les activités (présentes et potentielles), en définissant et en répartissant au mieux dans l'espace maritime les objectifs stratégiques sous la forme d'une carte des vocations, en réservant des zones particulières à une activité ou à la protection de la nature, et enfin en mettant en place une gouvernance qui permette une concertation permanente avec les parties prenantes. En France, la Stratégie nationale pour la mer et le littoral donne un cadre général de planification, puis des documents stratégiques pour chaque façade maritime en métropole et bassin maritime outre-mer la mettent en œuvre. Leur révision, prévue tous les six ans, commence en ce moment même par un débat public sous l'égide de la Commission nationale du débat public. À l'ordre du jour dominant le développement de l'éolien et de l'aquaculture ainsi que la mise en place de zones de protection forte.

Protéger la machine océan

Les aires marines protégées (AMP) sont une composante importante de la planification de l'espace maritime. Elles visent à protéger la biodiversité marine, tout en

poursuivant selon les cas d'autres objectifs. Dans certaines AMP, le pari est fait que, en conjuguant l'apport de connaissances, l'association des parties prenantes et leur mise en responsabilité dans une gouvernance adaptée, des solutions pourront être développées pour concilier un bon fonctionnement des écosystèmes avec le développement durable des usages en mer : c'est le cas des parcs naturels marins en France, à l'image du plus ancien d'entre eux, le Parc naturel marin d'Iroise qui entoure la pointe du Finistère. Dans d'autres cas (« protections fortes »), il s'agit de réduire le plus possible les pressions pour remplir un objectif prioritaire de protection de la biodiversité ; c'est par exemple le cas des réserves naturelles ou des cœurs de parcs nationaux (comme la réserve naturelle nationale des Bouches de Bonifacio, la zone cœur du Parc national des Calanques ou, à une tout autre échelle, la réserve naturelle nationale des Terres australes françaises). Les AMP françaises relèvent très majoritairement de la première catégorie, les protections fortes étant aujourd'hui encore concentrées dans des eaux lointaines et peu fréquentées (notamment autour des îles subantarctiques) ou limitées, en métropole, à des surfaces extrêmement réduites. Garantir la résilience des écosystèmes avec les AMP permet du même coup d'agir sur le sujet climatique. C'est vrai en matière d'adaptation : mieux vaut des récifs coralliens en bonne santé pour affronter les effets conjugués de l'acidification, du réchauffement et de la montée des eaux. Cela peut être également vrai en matière d'atténuation, dans certains contextes, par exemple avec la posidonie.

Le cas de la posidonie

Protéger la posidonie en Méditerranée apporte de nombreux bénéfices : zone de frayère et de refuge pour de nombreux organismes dont certains sont exploités, ressource alimentaire pour des poissons herbivores, oxygénation et purification de l'eau, protection contre l'érosion du littoral, *hot spot* de biodiversité... et puits naturel de carbone. L'effet est loin d'être négligeable, les herbiers de posidonie couvrant plus de 2 millions d'hectares en Méditerranée et un hectare pouvant séquestrer 2 500 à 3 000 t équivalent CO₂ sur plusieurs milliers d'années. Les menaces sont nombreuses ; l'exemple des ancrages des « superyachts » est particulièrement emblématique car les destructions occasionnées peuvent être importantes. Des solutions (zones d'interdiction, coffres, zones de mouillage et d'équipement léger...) ont été mises en place sous l'impulsion des autorités maritimes, en mobilisant les gestionnaires d'aire marine protégée. Malgré ces avancées, qui supposent beaucoup de concertation avec les acteurs concernés, les élus du littoral provençal, etc., la posidonie reste dans « un état de conservation défavorable ».

Des solutions fondées sur la nature

À l'interface terre-mer, très convoitée mais menacée par les risques côtiers et le changement climatique, la nature peut être une alliée pour se protéger contre les risques. Ainsi, la restauration des dynamiques hydrosédimentaires, l'enlèvement des épaves, la dépoldérisation des marais littoraux, la restauration des petits fonds marins... sont autant de « solutions fondées sur la nature » qui peuvent permettre d'appréhender le risque inondation, de répondre au risque de submersion marine et plus globalement de retrouver des écosystèmes fonctionnels. Dans la vallée de la Basse Saône, un projet financé par l'Union européenne a permis d'adapter ou de déplacer des équipements inadaptés face aux impacts du changement climatique (l'ancien camping, l'artificialisation de la rivière, la buse par laquelle se déverse aujourd'hui la Saône) dans une logique de recomposition spatiale de la vallée, qui au passage engendrera un gain de séquestration de carbone. La communauté de communes de Coutances parie elle aussi sur le collectif pour sortir d'approches très locales et individuelles de protection vis-à-vis de l'érosion du trait de côte, souvent coûteuses et peu efficaces, comme les enrochements : se placer à la bonne échelle hydro-sédimentaire (du cap de Flamanville à la pointe du Roc à Granville) et donner sa place à une protection « douce » du littoral, tout en identifiant des solutions pour les acteurs dont les infrastructures devront immanquablement se déplacer (campings, bâtiments servant à la conchyliculture...), au profit d'une meilleure protection de la population dans son ensemble vis-à-vis des risques de submersion.

À consommer avec modération !

L'océan est déjà pourvoyeur de nombreux biens et services. Certains jusqu'à leur limite dans le cas de la pêche, d'autres sous-évalués et menacés comme dans l'exemple des herbiers de posidonie, d'autres enfin menacés par les impacts des activités humaines. De toute évidence il présente un potentiel supplémentaire considérable pour apporter des solutions aux défis de la transition écologique. Mais est-ce simplement pour aller chercher en mer ce qui commence à manquer à terre ? Cela ne serait pas vraiment une transition, juste une perpétuation d'un système dont on a pris conscience des limites. Alors l'océan porteur de solutions, oui, mais modérément et avec circonspection, à l'appui d'une vraie transition écologique. X



PLAIDOYER POUR L'OCÉAN : DE LA SCIENCE VERS LE POLITIQUE



ÉRIC BRUN (X79)
ancien point focal du GIEC
pour le gouvernement français



ROMY HENTINGER
directrice du pôle Plaidoyer
et Coopération internationale
de la Fondation Tara Océan



PATRICIA RICARD
présidente de l'Institut
océanographique Paul Ricard

Les nouvelles approches scientifiques sont aujourd'hui essentielles pour mieux comprendre l'état de santé de l'océan et donc orienter les prises de décision politiques pour sa préservation. Pour cela, il faut chaque jour construire le dialogue *science to policy* entre deux mondes qui se parlent trop peu et qui ont des temporalités différentes. La gouvernance multilatérale de l'océan oscille entre avancées et désillusions, ambitions et incohérences des pays. Aujourd'hui, l'objectif est d'établir une feuille de route opérationnelle pour l'océan à 2050 qui se traduise par des actions locales à impacts significatifs sur la santé de l'océan.

← Plus aucun lieu n'est épargné par la pollution plastique. Même sur des zones très éloignées, comme ici dans le sud de la mer Rouge en Égypte, les sachets plastiques virevoltent au-dessus des récifs coralliens.

*Comment les discussions politiques sur l'océan ont-elles évolué ces dernières années ?
et en quoi consiste le dialogue entre science et politique sur l'océan ?*

Patricia Ricard : Le dialogue entre la science et le politique sur l'océan consiste à faire se rejoindre deux mondes. D'une part, la démarche scientifique de compréhension de l'environnement marin et, d'autre part, la démarche de développement des décideurs politiques et économiques, dont les résolutions se voient désormais infléchies par cette même connaissance scientifique dans le cadre du changement climatique. Au fil de l'histoire du rapport de l'homme à son environnement, le dialogue science-politique sur l'océan a peiné à se construire. Il a été accéléré par l'iconographie de la catastrophe : contamination au mercure à Minamata en 1956, poursuite des baleiniers par Greenpeace, marées noires du Torrey Canyon, catastrophe de Fukushima. Ces images se sont heurtées de plein fouet à la démocratisation fulgurante de l'accessibilité à un océan résonnant avec nos fantasmes d'évasion et de tourisme. Peu à peu la notion de l'océan, « bien commun » de l'humanité menacé, a pris place dans une conscience environnementale globalisée. →

→ **Romy Hentinger** : L'océan a longtemps été le grand oublié des négociations sur le climat ou la biodiversité. Fort heureusement, l'océan et sa biodiversité sont désormais considérés pour atteindre les objectifs climatiques, son rôle dans la régulation du climat est reconnu dans le cadre des conférences des parties (COP). Chaque année, davantage d'États mènent des actions pour protéger l'océan dans leurs plans nationaux. Une véritable avancée, quand on se rappelle qu'il a fallu attendre 2015 pour que l'océan soit mentionné explicitement dans le préambule de l'Accord de Paris lors de la COP21 !

Quels traités internationaux mobilisent les discussions autour de l'océan ?

RH : Aujourd'hui, la communauté internationale se mobilise autour d'un objectif ambitieux pour la biodiversité océanique, mais atteignable si la volonté politique est au rendez-vous : protéger 30 % de la surface de l'océan d'ici 2030 (actuellement seuls 8 % de l'océan et 1 % de la haute mer sont réellement protégés). Sur le plan du droit international, le traité sur la biodiversité en haute mer, dit traité BBNJ, a déjà été signé par 84 États depuis son adoption en mars 2023, c'est historique ! La haute mer, qui représente 64 % de la surface de l'océan, sera bientôt régie par un texte contraignant dans lequel se retrouvent les notions de patrimoine mondial de l'humanité, de partage équitable des bénéfices des ressources génétiques marines collectées en haute mer, de renforcement de capacités des pays du Sud et de soutien à la recherche internationale. Ces avancées ont été le fruit d'un dialogue politique croissant avec les scientifiques et organisations de la société civile, qui ont partagé les dernières connaissances pour alerter et porter la voix de l'océan dans les différents processus de gouvernance. Ce dialogue *science to policy* doit être d'autant renforcé que nous sommes aujourd'hui dans un *momentum* pour l'océan, entre des points de bascule de notre environnement, des cadres de gouvernance contraignants qui voient le jour, des positions d'États plus engagées, mais aussi des avancées technologiques qui permettent aujourd'hui un suivi et une science de haut niveau pour aider à la décision publique.

Qu'en est-il des initiatives locales ?

PR : La mer Méditerranée, souvent qualifiée d'« océan modèle », nous offre un retour d'expériences interpellant. Depuis les années 1960 sur la façade française méditerranéenne, des avancées majeures ont vu le jour en matière d'aménagement du littoral et des espaces marins, de protection de la biodiversité marine, d'assainissement

et d'épuration et de restauration des milieux. Toutes ces actions concrètes et éprouvées ont été possibles grâce à la concertation et à la coconstruction des parties prenantes et un dialogue société civile-science-politique apaisé et constructif. Paradoxalement, l'internationalisation des débats dans des cadres contraignants, supranationaux, le temps court des politiques et le temps lent des structures onusiennes, limitent et ralentissent les actions de terrain. L'accélération des urgences donne plus de voix aux ONG et médias, plus de dilemmes aux gouvernements et moins de capacités d'action aux gestionnaires locaux. Les traités issus de difficiles consensus sont des victoires historiques mais, dans l'attente des ratifications et traductions réglementaires, l'effondrement du « Système océan » s'accélère. Ce décalage de perspectives relègue malheureusement au second plan l'action locale et les initiatives concrètes. Le texte semble désormais l'emporter sur l'action.

En tant qu'ancien point focal du GIEC pour la France, pouvez-vous nous expliquer en quoi consistent son rôle et son dialogue avec le politique ?

Éric Brun : La Convention-cadre des Nations unies pour le changement climatique (CCNUCC) régit les accords internationaux pour lutter contre le changement climatique, notamment l'Accord de Paris. Cet accord mentionne explicitement le rôle de la science, en particulier pour comptabiliser les émissions nationales de gaz à effet de serre, pour fixer les objectifs de réduction des émissions compatibles avec l'objectif de réchauffement climatique à ne pas dépasser et pour contribuer au bilan mondial de cet accord établi tous les cinq ans. Le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC), créé avant la CCNUCC, et ses rapports sont mentionnés explicitement dans l'Accord de Paris. Dans les faits, les rapports du GIEC, dont les résumés sont approuvés à l'unanimité par la quasi-totalité des pays du monde, sont présentés formellement aux Parties signataires de la CCNUCC ou de l'Accord de Paris qui en reprennent certains contenus scientifiques dans les décisions prises chaque année lors des COP (*Conference of Parties*) ou bien dans le premier bilan mondial publié en 2023. Les rapports du GIEC traitent l'océan sous différents aspects, notamment du point de vue physique compte tenu de son rôle primordial vis-à-vis du système climatique (circulation océanique, bilan et stockage d'énergie et de carbone, échanges avec l'atmosphère, variabilité interannuelle du climat...). Les impacts du changement climatique sur l'élévation du niveau de la mer, sur l'acidification, sur les cycles biogéochimiques et les écosystèmes sont également traités dans les



rapports d'évaluation ou bien dans des rapports spéciaux, comme ce fut le cas en 2019 avec le rapport spécial sur l'océan et la cryosphère. Pour cela, le GIEC fait appel à des auteurs experts scientifiques de ces domaines. En revanche, le GIEC ne traite presque pas de sujets liés à la pollution de l'océan ou à son exploitation, sauf pour les aspects liés à la géo-ingénierie. Ces sujets sont évidemment cruciaux pour l'avenir de l'océan, mais leur lien avec l'évolution climatique est trop ténu ou trop indirect pour qu'ils entrent dans le périmètre des travaux du GIEC.

Quel est aujourd'hui le consensus scientifique adressé au politique et comment les messages scientifiques peuvent trouver un écho efficace au sein de la CCNUCC ?

EB : Aujourd'hui, le consensus scientifique est indiscutable sur la réalité et la gravité du changement

↑ 51^e session plénière du GIEC à Monaco lors de l'approbation du rapport spécial du GIEC sur l'océan, la cryosphère et le changement climatique en septembre 2019.

climatique. Fondées sur des modèles et le réchauffement déjà observé, les projections du niveau de réchauffement mondial en fonction des émissions futures ne sont plus sujettes à suspicion, d'autant que les projections présentées dans les anciens rapports du GIEC se sont, hélas, vérifiées lors de la dernière décennie.

Le 7^e cycle du GIEC a commencé en juillet 2023. Une participation active d'experts océanographes aux réunions dites de *scoping* permettra d'identifier quelles nouvelles connaissances scientifiques devront être évaluées d'ici 2028 dans les prochains rapports du GIEC. Une attention particulière sera sans doute donnée au rôle de l'océan dans l'action climatique, notamment la décarbonation, ce qui permettra d'alimenter en connaissances scientifiques le processus dit *Ocean and climate change dialogue* qui est désormais un événement récurrent lors des COP de la CCNUCC. Il faudra être très vigilant sur l'intégrité scientifique de messages que →

—> pourront porter certains pays sur la géo-ingénierie fondée sur l'océan ou bien sur la comptabilité des émissions dites négatives de gaz à effet de serre induites par certaines actions anthropiques sur les écosystèmes côtiers. Compte tenu de son mandat, il est certain que le GIEC ne traitera pas de façon approfondie la question de la pollution et de l'exploitation de l'océan, au-delà des aspects les plus liés à la lutte contre le changement climatique. Le cadre de gouvernance pour traiter de façon exhaustive et intégrée ces sujets reste donc à définir.

Comment la science peut-elle devenir plus accessible dans son dialogue avec le politique ?

PR : Il nous faut développer des outils de pilotage, la science fondamentale doit nourrir la science de la durabilité : il est nécessaire de combiner une science descriptive avec des méthodes d'approche axées sur la recherche de solutions. Les comités de pilotage et instances interdisciplinaires multiacteurs jouent un rôle essentiel en favorisant l'acculturation des différentes parties. Ainsi, les feuilles de route de demain devront valoriser la science au service des solutions. Elles doivent servir de cadres entre toutes les parties prenantes afin de traduire la connaissance disponible en action indispensable.

La prochaine conférence des Nations unies pour l'océan aura lieu à Nice en 2025, quelles sont vos attentes pour ce prochain grand rendez-vous ?

RH : Cette conférence doit être celle des engagements – par exemple la ratification du traité BBNJ ou d'un consensus pour un moratoire sur l'exploitation des grands fonds marins – et pas un nouveau catalogue de bonnes intentions de la part des États. En tant que fondation qui construit chaque jour le pont entre science et politique, nous espérons que l'appropriation de la connaissance scientifique par les États sera centrale. Nous espérons également que le lien entre santé environnementale et santé humaine sera discuté de manière plus systématique, mais aussi l'importance du continuum terre-mer pour la définition des réglementations et des politiques de gestion cohérentes entre les différents milieux (terrestres, fluviaux et marins). La pollution plastique est un exemple de l'impact de la terre vers la mer. Dans le cadre du futur traité contre la pollution plastique actuellement négocié à l'ONU, la réduction de sa production doit être la priorité, en agissant tout au long de la chaîne de valeur du plastique, pour éviter de penser le plastique que comme déchet en bout de chaîne.

“La prochaine conférence des Nations unies pour l'océan aura lieu à Nice en 2025.”

Comment intégrer dans ce dialogue les acteurs du secteur privé et de la finance ?

PR : Le modèle du carré magique dans le cadre de financements publics-privés apporte une dynamique partenariale intéressante. Ce carré associe les quatre piliers de la transition : la science, qui œuvre à la coconstruction de la connaissance et à sa diffusion ; l'économie, qui permet de développer l'innovation en soutenant la création de nouvelles filières ; la société civile (ONG, syndicats, médias), qui anime l'acceptation sociétale et la pression réglementaire ; et enfin l'institution et le territoire, qui veillent à l'adaptation législative et à la transition des territoires. Cependant, le secteur privé n'a pas encore complètement trouvé sa place dans cette dynamique vertueuse. Si les entreprises françaises sont déjà engagées dans la durabilité, leur responsabilité environnementale envers l'océan se heurte à l'absence d'indicateurs de performance. Le recours à la philanthropie serait plus efficace et pertinent mais reste trop rare en faveur de l'océan. Par ailleurs, on peut noter des effets de levier vertueux entre financements privés sur financements publics. Comment la finance peut-elle faire rimer durabilité et rentabilité et transformer les obstacles en tremplins de transformation durable ? Les sciences du vivant et les sciences de la durabilité nous proposent des solutions vertueuses prenant en compte les solutions fondées sur la nature ou bio-inspirées.

L'océan est le miroir de nos usages et nous renvoie l'image de nos erreurs ; il est temps d'inverser nos gestes, car l'océan sera l'accélérateur de nos dérèglements ou le socle de notre résilience. ✕

© Phoebe/ Adobe Stock



HOBART, EN ATTENDANT

↑ Bateau de la compagnie *Spirit of Tasmania* en maintenance dans le port d'Hobart.

OLIVIER POIVRE D'ARVOR
ambassadeur des pôles
et des enjeux maritimes

Olivier Poivre d'Arvor vient de publier *Deux étés par an* (roman, éditions Stock). Il met sa plume au service de sa passion et de sa fonction, pour l'Océan.

Depuis trois jours, doux et pluvieux, dans une petite chambre d'hôtel à Hobart, Tasmanie. J'attends, sans impatience, de prendre la mer. *While waiting for the Astrolabe to be repaired.* En anglais dans le texte, car nous sommes dans les mains de l'Australian Antarctic Division et dans celles de la météo australienne, pas vraiment favorable en cet été austral frémissant. Sérieux blizzard annoncé sur le Continent blanc. Et panne électronique, faute d'avion prêt à décoller, sur notre bon vieux navire polaire national à capacité glace, l'*Astrolabe*. Tandis que les dieux logisticiens travaillent à nous mener dès →

→ que possible à son bord, je m'abandonne, de plus en plus décalé. Plus les heures, les jours passent, moins je sors de ma chambre. Plus rien à faire, ni à découvrir, dehors. J'ai tout écumé du sel de cette capitale miniature. Hobart est une île en soi, en plus d'être en Tasmanie, elle-même un bout de triangle insulaire australien. L'Océan n'est pas loin pourtant, double à cet endroit, Indien et Pacifique, où verse la rivière Derwent. Sur ses rives, dès que les consommateurs quittent les tables de bois en plein air des bistros populaires, de grosses mouettes se jettent sur les vestiges des *fish and chips* avant de se frotter, le bec luisant, aux embruns de la tempête naissante.

Je vis désormais, à force de déchiffrer leurs récits dans cette chambre presque aveugle de l'hôtel Ibis Styles, avec des fantômes océaniques. Ceux de fameux explorateurs et navigateurs, Tasman, Marion du Fresne, Cook, d'Entrecasteaux, Bass, Flinders, Baudin, qui vinrent se protéger, dans le port d'Hobart, des redoutables quarantièmes rugissants. Celui de Charles Darwin qui fréquenta le coin lors de son tour du monde naturaliste sur le *HMS Beagle*. Celui d'Errol Flynn, natif d'Hobart, turbulent capitaine de bateau et trafiquant de coprah avant de devenir l'acteur mutin de grands films maritimes : *In the wake of the Bounty*, *Capitaine Blood*, *L'Aigle des mers*... Ceux des personnages des *Frères Kip* de Jules Verne qui s'amarrèrent dans l'un des plus profonds ports naturels au monde, où les ferries de la compagnie *Spirit of Tasmania* chargent aujourd'hui des bandes de jeunes étudiants en année sabbatique et des groupes de touristes amateurs de traversées mouvementées.

Hobart, siège de la recherche polaire australienne, n'est pas jumelé à Brest pour rien. Chez nous, dans le Finistère, nous abritons le siège de l'Ifremer et celui de l'Institut polaire français Paul-Émile-Victor qui nous permet d'embarquer, à partir d'Hobart, pour notre station en Antarctique Est, Dumont-d'Urville, de ravitailler nos chercheurs, de retrouver sur l'île des Pétrils la fameuse colonie de manchots Adélie et de nourrir l'image de cette préfecture si singulière des Terres australes et antarctiques françaises. À Hobart, souligne mon ami Jérôme Chappellaz, une des grandes figures de la glaciologie mondiale, un monument aux morts français disparus en Antarctique, surmonté d'un drapeau tricolore, rappelle que le voyage austral n'a pas souvent été de tout repos. Je vais m'y recueillir.

L'Océan, passion d'enfance, une enfance qui n'en finit jamais, est aujourd'hui devenu mon métier. Une ambassade, imaginez-vous ! C'est que, président du Musée national de la Marine, cofondateur avec Rym Benzina, Geneviève Pons et Pascal Lamy du Forum de la Mer de Bizerte alors que j'étais ambassadeur en Tunisie, me voilà proposé à la succession de Michel Rocard et de Ségolène Royal comme troisième ambassadeur pour les

pôles. À Jean-Yves Le Drian, alors ministre des Affaires étrangères, puis au Président de la République, je dis oui, mais à une condition : *qu'aux pôles, on ajoute à ma mission les océans !* L'Océan unique, bien commun. 71 % de la surface du globe. C'est oui, me disent mes commanditaires. Plus tard, hydrosphère et cryosphère à l'appui, j'obtiens de m'occuper également des fleuves, des zones humides, des glaciers... Peu à peu, mon territoire s'agrandit. La plus belle des ambassades, mais aussi la plus grande, ai-je coutume de dire. C'est désormais auprès de 80 % de la planète que je tente de porter la vision française, d'équilibre, de ce monde liquide et glacé si menacé. Les enjeux sont magnifiques face au monstre que nous avons enfanté depuis que nous nous régaloons des énergies fossiles. Celui d'un monde bientôt sans glace tant les effets du changement climatique agissent de la manière la plus dramatique dans les deux pôles, Nord et Sud, tout comme dans les quelque deux cent mille glaciers des Amériques, d'Afrique, d'Asie, d'Europe. Fin 2100, ils seront tous morts ces glaciers, vidés de leurs blancheurs épaisses, de leurs mémoires de l'atmosphère. Ce seront près d'un milliard de personnes qui seront ainsi privées d'eau, d'électricité, d'activités agricoles, notamment au pied des plus hauts sommets de l'Hindū-Kush-Himalaya qui ne pourront plus alimenter les grands fleuves asiatiques.

Devant moi, l'Antarctique que je m'apprete à visiter pour la seconde fois. On attend beaucoup dans des régions extrêmes. Il y a un an, coincé dans la station belge Princesse-Élisabeth en raison de vents très puissants qui empêchaient les avions de décoller, j'ai commencé à écrire *Deux étés par an*, un roman, une fable plutôt, qui raconte la migration d'un couple de sternes arctiques qui entreprennent leur dernière migration, du Groenland à ce pôle Sud géographique où je venais de passer quelques jours sous une tente. Je me projetais en 2048, date à laquelle le Traité de l'Antarctique, modèle de sagesse, portant la vision d'un continent tout entier dédié à la science et à la paix, pourra être reconsidéré. Aujourd'hui, à Hobart, c'est porteur de bonnes nouvelles que je vais visiter, avec des responsables de l'Institut polaire français, nos stations scientifiques françaises de Dumont-d'Urville et de Concordia : des financements pour la rénovation de ces lieux si précieux de la recherche polaire, pour un nouveau bateau à capacité glace, le *Michel Rocard*, pour un programme ambitieux autour de l'Antarctique... Il était temps. Nos dirigeants ont enfin pris la mesure du manque de moyens dédiés aux pôles qui, s'ajoutant à l'effondrement de la cryosphère partout dans le monde, rendait la position française intenable. En attendant de chevaucher, le cœur renversé, l'océan Austral, c'est à l'Antarctique que je pense. Là-haut, au Nord, au Groenland, les jeux sont faits, l'inlandsis de cette île grande comme l'Europe est condamné à disparaître et avec lui, à un terme de quelques centaines



d'années, le niveau de la mer à monter à plus de cinq mètres à l'échelle de la planète. Si l'Antarctique se mettait pareillement à vaciller et certains signes le laissent à penser, c'est avec quatre à cinq dizaines de mètres supplémentaires qu'il faudra imaginer le monde sous-marin de demain. Un autre bon milliard de personnes déplacées, bien plus que les 10 000 habitants de l'État polynésien de Tuvalu que l'Australie se propose déjà d'accueillir, tant la submersion de leur archipel est inévitable.

Le vent se met à souffler alors que la nuit tombe à Hobart. Demain, nous devrions partir. L'*Astrolabe* est réparé. Je sors marcher. Je sens et entends en me promenant le long des quais le souffle tiède et rauque de l'Océan. Sa colère. C'est qu'il est fâché le bougre, lui qu'on a pris pour la plus grande poubelle de plastiques et de microplastiques, qu'on pollue de mille manières, qui s'acidifie, au péril de la survie de nos coraux, qui perd oxygène, vitalité, biodiversité, qui se réchauffe, accroissant par la dilation thermique l'élévation du niveau de la mer, qu'on pille en le surpêchant, en détruisant ses espèces, qu'on racle dans ses fonds, qu'on s'apprête peut-être à offenser en commettant l'irréparable et en s'attaquant à ses grands fonds pour extraire des minerais dont on n'a pas véritablement besoin. Tandis qu'on l'exploite à n'en plus finir, gratis, sans rien lui redistribuer, ni soins ni droits, l'Océan voit par milliards les femmes et les hommes s'approcher de lui, toujours de plus près, comme fascinés par cette masse grandissante qui continue de faire peur,

↑ L'*Astrolabe* est un navire logistique utilisé pour le ravitaillement polaire. Il est rattaché aux Terres australes et antarctiques françaises.

“Le Traité de l'Antarctique, modèle de sagesse, portant la vision d'un continent tout entier dédié à la science et à la paix.”

tant sa part d'inconnu est considérable. Près de la moitié des humains ne savent pas nager. S'ils étaient si nombreux à ne pas savoir marcher, aimeraient-ils la Terre ? S'y froteraient-ils ? Et pourquoi, diable, alors que les effets du changement climatique vont, ouragans, tempêtes et cyclones à l'appui, faire de l'Océan une arme de destruction massive, pourquoi diable continuons-nous de nous approcher de lui, de le narguer, de le provoquer ?

Dans un pub, le seul qui soit resté ouvert alors qu'il fait nuit noire, je commande un verre de *Sullivans Cove*, un excellent whisky de Tasmanie. Rob, le serveur, un géant un peu déplumé, m'interroge. Je lui explique, l'*Astrolabe*, l'Antarctique, la menace climatique, l'Océan rebelle. Il me demande d'où je viens. Je lui dis que j'arrive juste de Dubaï, de la COP28, que je suis allé faire mon métier, parler de l'Océan et des pôles, dans l'insolent royaume des hydrocarbures. Ça le fait rire, Rob, les COP, il sait à peine ce que c'est, mais il sait que ça ne sert à rien, que de toute façon on est foutu. Rob est un ancien skipper de la fameuse course Sydney-Hobart. Il me raconte l'année 1998, la terrible tempête, des vents de soixante-dix nœuds. L'une des épreuves à la voile les plus meurtrières. Cent quinze bateaux partis de Sydney, quarante-quatre arrivés à Hobart, dont le sien. Six morts. Parmi eux, Bruce, son meilleur copain. Ce jour-là, il a décidé d'arrêter la course. Trop dur. Il a posé son bagage à Hobart. Trouvé un boulot au Hope & Anchor Tavern. Et comme moi, depuis lors, devant l'Océan, il attend. On ne sait quoi. X

À propos de l'océan

Le mot *océan* est emprunté au ^{XII}^e siècle au latin *Oceanus*, du grec *Ôkeanos*, nom de l'une des divinités primordiales de la mythologie grecque, celles qui, dans la nuit des temps, ont participé à la création du monde. Les Grecs en effet connaissaient intimement la mer Méditerranée, mais l'océan n'avait pour eux que l'existence mythique du dieu Océan.

Au moins quatre noms grecs pour la mer

Le nom le plus courant de la mer en grec était *thalassa* (resté en grec moderne) et la Méditerranée (du latin *mediterraneus* « au milieu des terres ») était qualifiée de *esô thalassa* « mer intérieure ». D'autre part, le grec *hals*, *halos* désignait au premier sens le sel marin, puis aussi par extension la mer, d'où *halieutikos* « relatif à la pêche en mer » et l'*halieutique*. La pleine mer, ou le large, se nommait plus précisément *pelagos*, d'où *pelagikos* « vivant au large » (cf. les poissons *pélagiques*).

Enfin, le nom de la haute mer, du grand large, était *pontos* (cf. le premier ÉtymologiX, de nov. 2016, à propos des ponts), nom commun devenu aussi un nom propre, *Pontos*, appliqué à la partie de la Méditerranée située au-delà du Bosphore : les Grecs ont qualifié cette partie de mer de *Pontos Axeinos*, où *axe(i)nos* signifie « inhospitalier », puis, comme pour amadouer une mer tumultueuse, *Euxeinos*, où *euxe(i)nos* signifie au contraire « accueillant ». De là vient par le latin l'ancien *Pont-Euxin*, c'est-à-dire la *mer Noire* actuelle, ainsi nommée autour du ^{XIII}^e siècle sous l'influence du byzantin et de l'arabe.

Et l'on en vient à la mythologie car *Pontos* désignait aussi une divinité primordiale, la personnification des eaux marines, un demi-frère d'Océan.

De la mer à l'océan par la mythologie

La narration la plus complète de la création du monde dans la mythologie grecque se trouve dans *La Théogonie* d'Hésiode (^{VIII}^e siècle avant J.-C.). À l'origine de tout, Chaos personnifiait

le vide primordial, antérieur à la création des éléments du monde (du grec *Chaos* viennent les mots *chaos* et *gaz*, cf. l'ÉtymologiX de mai 2017). Puis vint Gaïa (la Terre), qui enfanta Ouranos (le Ciel étoilé), Ourea (les hautes Montagnes) et « aussi la mer inféconde aux furieux gonflements, Pontos, sans l'aide du tendre amour. Mais ensuite, des embrassements d'Ouranos, elle enfanta Océan [...] et l'aimable Téthys ». C'est alors qu'Océan, un Titan, et Téthys, la divinité féminine de la mer, ont engendré tous les fleuves terrestres. En effet Océan lui-même était assimilé à un fleuve revenant à sa source, formant un anneau tout autour du disque plat de la Terre et alimentant les milliers de fleuves, comme le Nil notamment, s'écoulant jusqu'à la mer Méditerranée. Les Grecs en effet n'avaient pas d'accès aux océans réels. Ils n'avaient qu'un petit aperçu, au-delà des colonnes d'Hercule (les monts de Gibraltar), d'une mer déjà nommée par Hérodote *Atlantis thalassa*, c'est-à-dire mer située au-delà des montagnes d'Atlas, le Géant condamné par Zeus à supporter la voûte du ciel. Le nom de l'*océan Atlantique* est donc doublement grec et mythologique.

Épilogue

On a découvert toute l'étendue du vaste océan progressivement jusqu'au Moyen Âge. L'océan *Pacifique* fut ainsi nommé par l'explorateur portugais Magellan en 1520, car il y rencontrait des eaux calmes. Le nom de l'océan *Indien* va de soi. Les *océans Arctique* et *Antarctique* ont encore des noms doublement grecs et mythologiques : Zeus a transformé la nymphe Callisto et leur fils Arcas en la Grande et la Petite Ourse, en grec *Arktos*, de *arktos* « ours brun », d'où *arktikos* « au Nord » et *antarktikos* « à l'opposé du Nord ». X



PIERRE
AVENAS (X65)