

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Les écosystèmes marins et leurs enjeux



Notre site



N°123
JUILLET 2026

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom



RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 2271-8052 (en ligne)

ISSN 1268-4783 (imprimé)

Série trimestrielle - N°123 - Juillet 2026

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle,
énergétique et numérique
120, rue de Bercy - Télédock 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales-des-mines.org>

Grégoire Postel-Vinay
Directeur de la publication
et Rédacteur en chef

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale

Daniel Boula
Secrétaire général adjoint

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Nuria Gorris
Cheffe de projet multimédia

Publication

Photo de couverture
L'*Atalante* © Stéphane Lesbats - Ifremer

Iconographie
Daniel Boula

Mise en page
Magali Gimon

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Pierre Couveinhes
Président du Comité de rédaction

Mireille Campana

Fabrice Dambrine

Dominique Dron

Ivan Faucheux

Jean-Luc Laurent

Richard Lavergne

Philippe Merle

Michel Pascal

Didier Pillet

Grégoire Postel-Vinay

Anne-Cécile Sigwalt

Claire Tutenuit

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

Les écosystèmes marins et leurs enjeux

5

Introduction

François HOULLIER

Quelles trajectoires pour l'océan au XXI^e siècle ?

7

Continuum observation - modélisation -
jumeau numérique de l'océanPierre-Yves LE TRAON, Pierre SERODES
& Bertrand CHAPRON

14

Cyclones tropicaux :
nouvelles capacités satellitaires,
validation et réponse océanique

Bertrand CHAPRON et Alexis MOUCHE

21

Risques et opportunités de l'adaptation
à l'élévation du niveau de la merGonéri LE COZANNET,
Mirna BADILLO-INTERIANO,
Cécile CAPDERREY, Angélique MELET
& Rémi THIÉBLEMONT

L'océan au cœur de la transition énergétique

26

La place de l'océan
dans la transition énergétique

Marion CUIF

Sommaire

30

L'Observatoire national
de l'éolien en mer : renforcer
la connaissance de la biodiversité
pour éclairer la transition énergétiqueMarion CUIF, Olivier LE PIVERT
& Maëlle NEXER

34

L'expertise scientifique collective (ESCo)
sur les effets de l'éolien en mer
sur la biodiversitéEugénie CAZAUX, Cédric BACHER,
Nathalie NIQUIL, Marion CUIF,
Valérie LALLEMAND-BREINTENBACH
& Olivier LE PIVERT

39

Éolien en mer : effets et enjeux
d'une nouvelle contrainte spatiale
sur les pêcheriesAdeline BAS, Sophie LÉONARDI,
Manuel BELLANGER, Hélène BUCHHOLZER,
Marjolaine FRÉSARD, Juliette JESTIN,
Pascal LE FLOC'H, Christelle LE GRAND,
Célya MARTIAL, Huixin WU & Olivier THÉBAUD

45

L'hydrolien : une nouvelle filière
pour accélérer la transition
énergétique française ?Grégory GERMAIN, Christophe MAISONDIEU
& Marion CUIF

50

La planification de l'espace maritime
comme levier des transitions
socio-environnementales ?Neil ALLONCLE, Adeline BAS
& Céline JACOB

54

La décarbonation du transport maritime :
le défi de la décennie pour un géant
des mers

Pierre MARTY, Maximilien SIMON
& Lucas LEON

Comment conjuguer un océan sain et nourricier

59

Santé unique et océan :
une approche intégrée indispensable

Wilfried SANCHEZ, Romane LUCQ
& Tristan RENAULT

63

Vers une observation intégrée
des écosystèmes marins côtiers :
enjeux, dispositifs et perspectives

Yannick GUEGUEN, Annie FIANDRINO,
Lucie COCQUEMPOT & Wilfried SANCHEZ

68

Virus humains : des eaux usées
aux coquillages, comment protéger
le consommateur ?

Soizick F. LE GUYADER, Marion DESDOUITS,
Joanna OLLIVIER & Pascal GARRY

72

Pollution plastique de l'océan :
état des lieux, lacunes des connaissances
et leviers pour l'action publique

Arnaud HUVET, Ika PAUL-PONT,
Xavier COUSIN & Wilfried SANCHEZ

76

Conjuguer un océan sain et nourricier
en Outre-mer : l'aquaculture
dans et pour l'environnement
en Polynésie française

Guillaume MITTA, Cristián J. MONACO,
Simon Van WYNSBERGE & Thomas CAMUS

81

L'aquaculture à la croisée des chemins :
produire durablement dans un monde
qui fluctue

Tristan MACQUET et Benjamin DENJEAN

85

Chalutage et Aires marines protégées :
comprendre les multiples enjeux,
proposer des solutions concertées

Clara ULRICH

89

Mieux comprendre les captures
accidentelles de dauphins
dans le golfe de Gascogne
pour pouvoir les réduire

Clara ULRICH, Jérôme SPITZ
& Pierre PETITGAS

Connaissance de l'océan profond

93

Les enjeux de connaissance
des grands fonds marins

Valérie CHAVAGNAC, Pierre-Yves LE MEUR,
Pierre-Marie SARRADIN, Clémence COTTEN,
Céline DÉGREMONT, Bérengère HUSSON,
Violette LARRIEU & Yacine MOUFID

100

La Flotte océanographique française
et l'accès aux grands fonds marins :
enjeux stratégiques et technologiques

Maximilien SIMON, Jan OPDERBECKE
& Christine DAVID

105

La gouvernance internationale de
l'océan profond : un maillage normatif et
institutionnel complexe mais structuré

Dr Bleuenn GUILLOUX et Dr Youna LBL LYONS

113

Les grands fonds marins :
le point de vue du Comité
des parties prenantes de l'Ifremer

Diane VASCHALDE, Céline LIRET,
Christophe SIRUGUE, Geneviève PONS
& Sébastien TREYER

Cartographie des ressources et atouts français

118

25 ans de pilotage stratégique portuaire en France : trois inflexions paradigmatiques (1999-2025)

Éric FOULQUIER et Antoine FRÉMONT

123

Cartographie de la recherche publique océanique française

Hervé MOULINIER et Antoine DOSDAT

129

Cartographie des acteurs de l'économie bleue

Nathalie MERCIER-PERRIN

132

Cartographie française des organisations non gouvernementales de protection de l'environnement marin et littoral

Gauthier CARLE

Hors Dossier

136

Prospective stratégique et limites planétaires : construire une nouvelle grammaire de futurs possibles

Pierre-Baptiste GOUTAGNY

141

Traductions des résumés

147

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par François HOULLIER

Introduction

Par François HOULLIER
PDG de l'Ifremer

Objet de curiosité, de fascination, de crainte, voire d'effroi, plus grand biome de la planète, longtemps perçu comme infini, l'Océan demeure une frontière de la connaissance : au cours des cinquante dernières années, l'accès aux grands fonds marins a révélé des écosystèmes jusque-là inconnus (Corliss, 1979) et fondés sur la chimiosynthèse ; plus près de nous, notre compréhension de la biodiversité marine a été bouleversée par le développement des approches moléculaires (Sunagawa, 2015) ; et les incertitudes sur les perturbations de la circulation Océanique induites par le dérèglement climatique demeurent ouvertes (Rahmstorf et Caesar, 2026).

L'Océan constitue aussi l'un des grands espaces stratégiques du XXI^e siècle. Il se trouve en effet au carrefour de questions qui structurent nos sociétés : non seulement le climat et la biodiversité, la sécurité alimentaire, la santé et la transition énergétique – c'est-à-dire l'habitabilité même de notre planète –, mais aussi le commerce mondial, la souveraineté technologique et industrielle, les rivalités géopolitiques pour l'espace et les ressources...

Quelques chiffres suffisent à appréhender cette centralité. L'Océan absorbe environ 90 % de l'excès de chaleur induit par les activités humaines (von Schuckman *et al.*, 2023) et près de 30 % du surplus de CO₂ émis dans l'atmosphère (Friedlingstein *et al.*, 2026). Il agit ainsi comme un puissant régulateur du système climatique mondial. Mais cette fonction a un coût, non seulement pour l'Océan lui-même (réchauffement des eaux, acidification, désoxygénation, modification des écosystèmes, déplacement des populations de poissons...), mais aussi pour la société (élévation du niveau de la mer, multiplication des événements extrêmes...). Si l'Océan protège encore nos sociétés des effets les plus immédiats du dérèglement climatique, il se transforme de plus en plus rapidement et de plus en plus profondément sous nos yeux (Lévy *et al.*, 2026).

Malgré des politiques régionales volontaristes, notamment en Amérique du Nord ou en Europe, nous observons aussi une tendance globale à la dégradation des ressources halieutiques, du fait de l'accroissement de l'effort de pêche et du maintien de pêcheries illégales, non rapportées ou non réglementées (FAO, 2024). Ce phénomène est aujourd'hui aggravé par le dérèglement climatique. Nous constatons aussi que les pollutions et contaminations, le plus souvent d'origine continentale, affectent les écosystèmes marins, jusqu'au large bien au-delà des écosystèmes estuariens ou côtiers. Cependant, nous manquons encore de connaissances pour tracer les effets de ces perturbations : sur ce sujet, l'écart entre les connaissances à terre et en mer est de l'ordre de quelques décennies (Sanchez *et al.*, 2023).

L'état de santé de l'Océan est aujourd'hui d'autant plus alarmant que ses usages sont nombreux, s'intensifient ou se diversifient : transport maritime, pêche, exploitation *offshore* des hydrocarbures et, peut-être demain, des ressources minérales, tourisme, énergies marines renouvelables...

L'Océan est également une infrastructure critique de la mondialisation. En volume, environ 80 % du commerce international s'effectue par voie maritime (UNCTAD, 2025). Plus de 99 % des flux de données intercontinentales transitent par les câbles sous-marins¹. Nos chaînes logistiques, nos flux énergétiques, nos données, nos économies dépendent quotidiennement d'infrastructures certes largement invisibles, mais profondément maritimes. L'Océan est enfin un espace de puissance, de sécurité et de souveraineté. Accès aux ressources, protection des infrastructures critiques, maîtrise des espaces sous-marins, compétition technologique, présence scientifique, capacités d'observation et d'intervention : autant de dimensions devenues centrales dans un contexte international marqué par la montée des rivalités stratégiques et l'aggravation du dérèglement climatique.

Dans ce contexte, 2025 aura marqué une étape singulière dans la reconnaissance du fait Océanique. En France, l'année de la Mer et la 3^e conférence des Nations unies pour l'océan (UNOC3, Nice, 9-13 juin) ont constitué une séquence inédite, d'autant plus que pour la première fois dans le cycle des conférences sur l'océan, cette conférence a été immédiatement précédée par un grand congrès scientifique, organisé par le CNRS et l'Ifremer, ayant accueilli plus de 2 000 scientifiques du monde entier². En Europe, la finalisation du pacte européen pour l'Océan, annoncé en juin 2025 à Nice, va déboucher sur une proposition de loi (*European Ocean Act*). Dans le monde, l'entrée en vigueur du traité Fish 1 négocié à l'OMC et qui interdit notamment les subventions à la pêche illégale, non déclarée et non réglementée, a été suivie de la ratification du traité de la Haute Mer (dit BBNJ pour *Biodiversity beyond national jurisdiction*), entré en vigueur le 17 janvier 2026.

¹ <https://submarine-cable-map-2025.telegeography.com/>

² <https://one-ocean-science-2025.org/>

La capacité à explorer, cartographier, observer et connaître l'Océan, à en comprendre et anticiper les transformations constitue donc un enjeu à la fois scientifique et stratégique.

Ce numéro s'intéresse principalement aux écosystèmes marins et aux enjeux qui leur sont associés : il ne traite donc que d'une partie des sujets évoqués dans cette introduction. Trois thèmes sont privilégiés : la place de l'Océan dans la transition énergétique, au moment où le déploiement de l'éolien en mer s'accélère et pose des questions nouvelles en termes de planification de l'espace maritime et d'effets potentiels sur les milieux marins ; la conciliation de la fonction nourricière de l'Océan et de la préservation de la santé de ses écosystèmes dans le cadre d'une approche globale de la santé unique (*One Health*) ; la connaissance de l'océan profond, de ses écosystèmes très particuliers, alors que l'éventualité de l'exploitation des ressources minérales des grands fonds marins est un objet de débat.

De façon transversale, plusieurs articles traitent de l'observation de l'Océan, sujet essentiel aussi bien pour la communauté scientifique et la compréhension des phénomènes que pour la définition et la mise en œuvre des politiques publiques ou pour les négociations internationales relatives à l'Océan. Ce sujet fait actuellement l'objet de nombreux développements méthodologiques et technologiques qui vont de l'exploration au jumeau numérique, en passant par l'observation, la surveillance, la gestion des données et la modélisation. Depuis de nombreuses années, la France s'est fortement engagée dans le soutien et le développement du système d'observation global de l'Océan. C'est un domaine auquel l'Europe porte aussi une attention croissante dans un contexte de menace de désengagement des États-Unis d'Amérique, qui en était le pilier historique.

Ce numéro fournit aussi une cartographie des acteurs français de l'économie bleue – secteur qui, à l'échelle internationale, se développe plus rapidement que la moyenne des autres secteurs – et des acteurs de la société civile engagés dans la protection de l'Océan. S'agissant de la recherche scientifique et technologique française, un point saillant mérite d'être souligné : alors que l'Océan n'était que très modestement présent dans les premiers programmes des investissements d'avenir, il est aujourd'hui à l'agenda de France 2030, reflétant en cela la reconnaissance de l'importance des enjeux qui lui sont attachés.

Références

CORLISS J.B. *et al.* (1979), "Submarine thermal springs on the Galápagos rift", *Science*, 203(4385), pp. 1073-1083, <https://doi.org/10.1126/science.203.4385.1073>

FAO (2024), *The State of World Fisheries and Aquaculture – Blue Transformation in action*, <https://doi.org/10.4060/cd0683en>

FRIEDLINGSTEIN P. *et al.* (2026), "Global carbon budget 2025", *Earth Science System Data*, 18, pp. 3211-3288.

LÉVY M. *et al.* (2026), "The 2026 starfish barometer", in *10th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR10)*, edited by: Grégoire, M., Brasseur, P., Garric, G., Karstensen, J., Lionello, P., Marcos, M., Poulain, P.-M., & Staneva, J., Copernicus Publications, *State Planet*, 7-osr10, 1, <https://doi.org/10.5194/sp-7-osr10-1-2026>, 2026.

SANCHEZ W., MAMY L., PESCE S. & LEENHARDT S. (2023), « Expertise scientifique collective sur les effets des produits phytopharmaceutiques sur la biodiversité et les services écosystémiques : éléments de contexte », *Natures Sciences Sociétés*, 31(2), p. 209, <https://doi.org/10.1051/nss/2023041>

RAHMSTORF S. & CAESAR L. (2026), "Opinion: The AMOC is weakening – time to take the evidence seriously", *EGUsphere* [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2026-2110>

SUNAGAWA S. *et al.* (2015), "Structure and function of the global ocean microbiome", *Science*, 348(6237), <https://doi.org/10.1126/science.1261359>

UNCTAD (2025), "Review of maritime transport 2025", 173 pages, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf

VON SCHUCKMANN K. (2023), "Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?", *Earth Science System Data*, 15, pp. 1675–1709.

Continuum observation - modélisation - jumeau numérique de l'océan

Par Pierre-Yves LE TRAON
Mercator Ocean International, Ifremer

Pierre SERODES
Ifremer

& Bertrand CHAPRON
Ifremer

Face à la « triple crise » climatique, de biodiversité et des pollutions, la compréhension et la prévision de l'évolution de l'océan nécessitent une intégration renforcée entre observations, modélisation numérique et technologies émergentes de jumeaux numériques. Cet article examine le rôle central du système mondial d'observation de l'océan (GOOS), combinant mesures *in situ* (flotteurs Argo, bouées, navires) et observations satellitaires (programmes Copernicus/Sentinel), pour le suivi des Variables Essentielles de l'Océan (EOVs) physiques, biogéochimiques et biologiques.

Nous analysons comment l'exploitation de volumes massifs de données, traitées selon les principes FAIR et enrichies par l'intelligence artificielle, permet d'améliorer la prédictibilité des modèles océaniques et de développer des jumeaux numériques de l'océan (JNO). Ces répliques virtuelles dynamiques visent à simuler des scénarios de gestion durable, à anticiper les événements extrêmes et à éclairer les politiques d'adaptation au changement climatique.

L'article met en lumière les initiatives européennes majeures (Destination Terre, OceanEye) qui structurent cette ambition, tout en soulignant les défis restants : pérennisation des réseaux d'observation, amélioration de la modélisation biogéochimique, et intégration des innovations technologiques pour une économie bleue durable.

Observer pour comprendre et prévoir l'évolution de l'océan et du climat

Répondre à la « triple crise » que représentent le changement climatique, la perte de biodiversité et les pollutions exige de nouvelles stratégies dans nos façons de traiter les observations et d'améliorer les modèles numériques, pour mieux comprendre et prévoir l'évolution dynamique du système terrestre et ses interactions complexes avec les activités humaines et les écosystèmes.

Dans ce sens, les sciences de la Terre sont maintenant largement entrées dans l'ère de l'exploitation de vastes volumes de données. Ces données, d'origines souvent diverses, restent encore difficiles à organiser, et ne sont pas toutes parfaitement indexées et ni associées à des causes identifiées. Même largement accumulées, les données ne permettent pas toujours des exploitations directes. Toutefois, avec l'émergence de nouvelles méthodes d'analyse, renforcées par les technologies de stockage et de calcul, nous sommes de moins en

moins submergés par une possible surcharge d'informations et des progrès importants sont réalisés. Des représentations plus générales et robustes, liant différentes variables dans le temps et l'espace, peuvent être découvertes et suivies. Aujourd'hui, ces nouvelles représentations apportent déjà des éclairages nouveaux sur les systèmes complexes et couplés de notre planète. La modélisation fondée à la fois sur la résolution de systèmes d'équations et sur ces ensembles de données d'observation de la Terre (OT) offre dès à présent la possibilité d'établir des projections futures plus précises, moins biaisées. Participant aux découvertes essentielles sur l'état du système Terre, elle guide également le développement de nouveaux capteurs et l'optimisation de leurs déploiements.

Avec cette ambition de mieux comprendre les différentes composantes du système Terre, simuler une « réplique numérique » de l'océan est au cœur des développements actuels. Cela reste un défi immense et une ambition très coûteuse. Mais l'intérêt est fondamental. L'océan est le plus grand capteur d'énergie

solaire sur Terre, au premier plan vis-à-vis de l'évolution du climat. Plus de 90 % de l'excès de chaleur reçu par la planète en raison du réchauffement climatique et plus de 25 % des émissions anthropiques de CO₂ sont absorbés par l'océan. À sa surface, plus de 75 % des flux d'évaporation-précipitation y ont lieu. Cette grande quantité de chaleur stockée est alors modulée et distribuée globalement par une circulation complexe, impliquant des échelles allant du mètre au millier de kilomètres. En interaction permanente avec l'atmosphère, cela peut déclencher des rétroactions multiples et souvent non linéaires, depuis longtemps connues pour favoriser l'émergence de phénomènes téléconnectés pouvant conduire à l'émergence de désastres naturels – par exemple, l'influence de El Niño et La Niña sur des événements météorologiques extrêmes distribués sur l'ensemble de la planète.

Pour insister davantage et illustrer le défi, il est utile de se rappeler que de nombreux phénomènes physiques/biologiques et chimiques se produisent généralement à des échelles spatiales et temporelles plus fines que la discrétisation des modèles numériques actuellement disponibles. De nombreux processus restent par conséquent mal et/ou non résolus, constituant une source majeure d'incertitude et limitant la prédictibilité de ces modèles. Des informations à fine échelle issues d'observations ciblées sont souvent très coûteuses et encore rarement disponibles, limitant une compréhension quantitative de la manière dont l'ensemble des processus interagissent pour influencer les flux d'énergie, les bilans de flottabilité, les mouvements verticaux et les interactions physico-biologiques à l'intérieur de l'océan. Par exemple, les mécanismes responsables de l'accumulation saisonnière d'oxygène, dans les couches supérieures de l'océan, demeurent encore largement énigmatiques.

En conséquence, afin d'améliorer les prévisions de son évolution, l'océan nécessite des capacités très importantes et ciblées d'observations. Elles sont et seront nécessaires pour mieux révéler les processus et leurs interactions, maintenir le suivi des variables essentielles (e.g. température, salinité, niveau), confronter les observations passées et actuelles, révéler les occurrences et similarités, identifier des précurseurs et mieux prévenir des événements rares, souvent extrêmes. Les océans subissent malheureusement des pressions majeures, non seulement en raison du changement climatique, mais aussi des activités humaines (e.g. pollution, surpêche, extraction minière). Des événements extrêmes se sont multipliés ces dernières années, comme les vagues de chaleur marine, des submersions côtières, une intensification des cyclones, des phénomènes de blanchissement des coraux, des blooms exceptionnels de phytoplancton éventuellement toxiques, la prolifération anormale des sargasses... En conséquence, les écosystèmes marins démontrent parfois des évolutions très rapides sous ces effets cumulés, combinés à la surpêche et aux multiples autres perturbations anthropiques, menaçant les services écosystémiques essentiels qu'ils rendent. Les ressources marines, qui sont indispensables aux moyens de subsistance et constituent une source vitale de protéines à l'échelle mondiale, connaissent déjà des déclinés locaux très

marqués. Mieux comprendre et anticiper comment les écosystèmes marins réagissent au changement climatique et aux pressions anthropiques représente à la fois un enjeu scientifique et sociétal majeur.

En effet, outre ce rôle essentiel de l'océan dans l'équilibre climatique et comme source de nourriture, l'océan contribue largement au développement de l'économie mondiale. 90 % du transport de marchandises s'effectue par voie maritime. La pêche et l'aquaculture fournissent plus de 20 % de la ration protéique moyenne de trois milliards de personnes. Les énergies marines renouvelables offrent un potentiel considérable pour l'organisation de la transition énergétique.

Une gestion durable de l'océan et de ses ressources, visant à préserver l'état de santé des océans tout en contribuant au développement de l'économie bleue, est bien impérative. Comme mentionné précédemment, celle-ci doit nécessairement s'appuyer sur des réseaux d'observations (principalement *in situ* et satellitaires) pour un suivi homogène et continu afin de constituer des séries de long terme. Cela est indispensable. Documenter l'état de l'océan s'appuie sur ces combinaisons de mesures (satellites et *in situ*) et de la modélisation numérique. Les mesures satellitaires permettent d'accéder à des observations globales de quelques paramètres essentiels. Les mesures *in situ* sont uniques pour observer l'intérieur de l'océan et documenter davantage de paramètres physiques, biogéochimiques et biologiques dans la colonne d'eau. La modélisation permet, par l'assimilation de ces données, de synthétiser une grande partie de ces informations et de réaliser des prévisions à l'échelle de plusieurs mois. Combinés, ces ensembles de données – qui vont des mesures locales de profondeur aux archives d'images de surface, acquises par des instruments embarqués sur satellites et couvrant différentes modalités et résolutions – ainsi que les sorties de simulations numériques, constituent actuellement les premiers moyens nécessaires pour mieux comprendre les changements environnementaux, affiner la prévision des risques et éclairer la prise de décision en faveur d'un développement durable.

Décrire et prévoir l'évolution des propriétés physiques devient de plus en plus robuste et cohérent. Ce n'est pas le cas des propriétés biogéochimiques. L'impact du changement climatique sur les océans ne peut donc pas encore être anticipé pour tous les compartiments du système océan au sein du système Terre.

Dans ce cadre, les jumeaux numériques (JN) des différents compartiments du système complexe Terre sont des technologies émergentes. Les JN visent à faciliter l'évaluation continue de leurs homologues physiques et/ou numériques en collectant, rassemblant, stockant, analysant et en fournissant un retour d'information sur les données et les modèles. Dans une perspective d'observation de la Terre, un élément important du développement actuel des jumeaux numériques océaniques (JNO) est de pouvoir s'appuyer sur des approches centrées sur les données. Ces approches bénéficient des progrès des méthodes d'intelligence artificielle et sont actuellement des couches essentielles pour développer et valider des répliques améliorées du système

océan-glace-atmosphère réel. Ces dernières années, plusieurs modèles de prévision météorologique exclusivement fondés sur les données ont atteint des performances comparables, voire supérieures, à celles des modèles physiques traditionnels pour des coûts computationnels très largement réduits. De premiers résultats dans le cadre de la prévision océanique prouvent également de telles capacités pour certaines variables. Ces progrès vont contribuer à l'élaboration de JNO capables de simuler plus des scénarios de gestion durable de l'océan en soutien des décisions visant à atténuer les effets du changement climatique et à s'y adapter.

Observer l'océan

Le système mondial d'observation de l'océan est conçu pour répondre à des besoins variés (recherche, climat, santé de l'océan, services océaniques et usagers de la mer). Il prend en compte la complémentarité entre les observations *in situ* et les différents capteurs embarqués sur différents satellites, en lien avec la modélisation (océan numérique).

Observations *in situ*

Le système global d'observation à long terme de l'océan est mis en œuvre pour sa composante *in situ* via les contributions volontaires des pays. Il est coordonné par la COI (Commission Océanographique Intergouvernementale) de l'Unesco dans le cadre du programme international GOOS (Global Ocean Observing System), voir la Figure 1. Les données d'observation de l'océan contribuent au suivi d'un

ensemble d'Essential Ocean Variables (EOVs) pour la physique (e.g. température, salinité, courants), la biogéochimie (e.g. oxygène, nutriments, carbone et pH) et la biologie (e.g. phytoplancton, zooplancton). Elles sont collectées *via* plusieurs réseaux internationaux : flotteurs profilants Argo, flotteurs de surface, mouillages multidisciplinaires, navires de recherche, navires d'opportunité, marégraphes, planeurs sous-marins, radars haute fréquence. Ces réseaux ont été mis en place de façon progressive au cours des 30 dernières années, en passant par des études de faisabilité et des phases pilotes. Le programme Argo représente à cet égard une véritable révolution. Avec près de 4 000 flotteurs autonomes mesurant température et salinité entre 0 et 2 000 m (et désormais jusqu'à 6 000 m, ainsi que des variables biogéochimiques), Argo fournit une couverture globale et homogène de l'océan intérieur, essentielle pour le suivi de l'océan et du climat. Des réseaux émergents sont en cours d'intégration dans le système global (e.g. câbles sous-marins, mesures du CO₂ de surface, données des navires de pêche). Des phases pilotes démarrent pour des réseaux plus prospectifs (e.g. collecte et analyse de l'ADN environnemental pour caractériser la biodiversité marine). Les réseaux évoluent ainsi régulièrement en fonction des besoins de la recherche et des utilisateurs, et des avancées technologiques.

Observations spatiales

Les satellites apportent une contribution unique par leur couverture globale. Selon les instruments et le choix des orbites, les observations vont avoir des résolutions spatiales variables, ainsi que des répétitivités tempo-

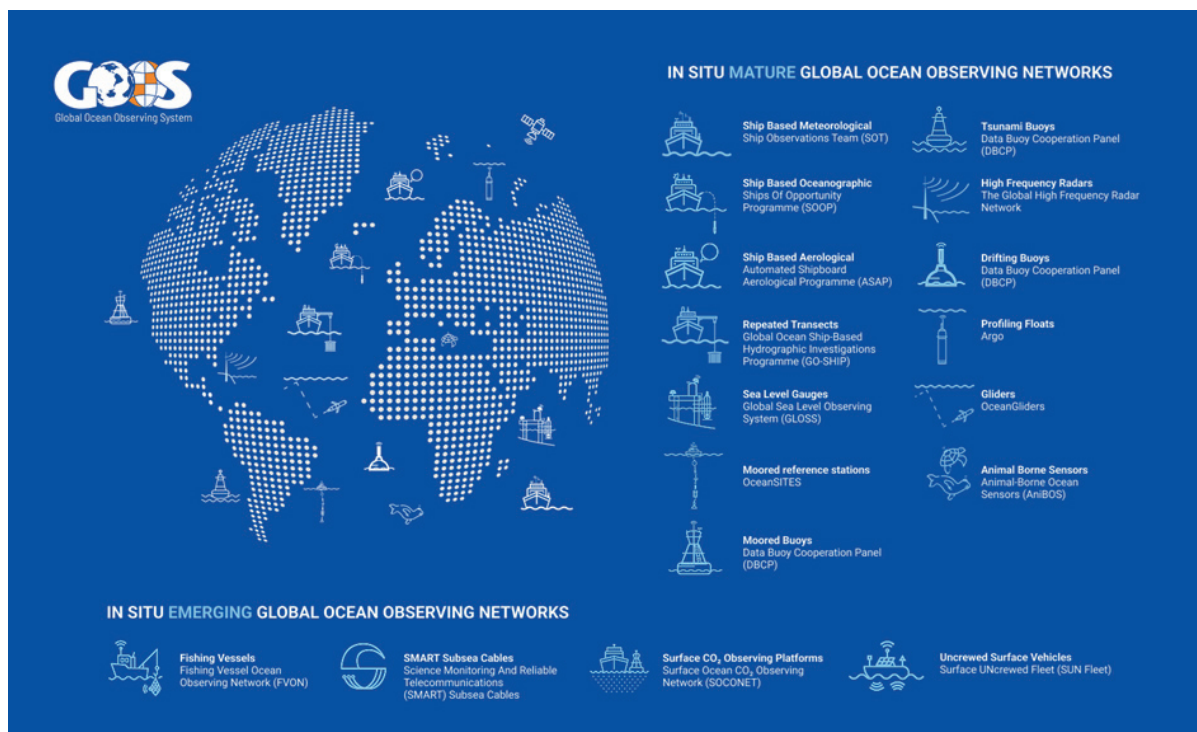


Figure 1 : Les différents réseaux *in situ* du système global d'observation de l'océan (Global Ocean Observing System (GOOS)) (Source : IOC/GOOS).

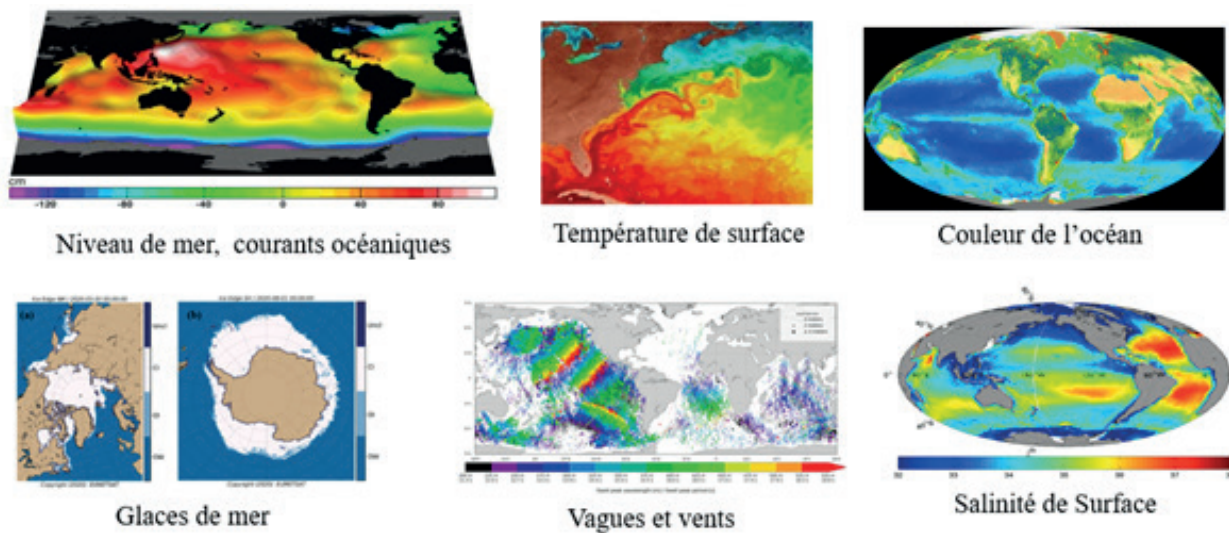


Figure 2 : La contribution unique des satellites pour la prévision de l'océan.

relles distinctes (voir la Figure 2). Embarquant des capteurs sensibles à différentes propriétés de la surface, ces observations satellitaires fournissent la plupart des variables clés nécessaires pour contraindre et valider les modèles océaniques, et pour alimenter de nombreuses applications. Les satellites sont mis en œuvre par les agences spatiales des pays avec une coordination internationale apportée par le CEOS (Committee on Earth Observation Satellites). Aujourd'hui, l'Europe fournit une composante majeure *via* le programme Copernicus.

On distingue deux grandes familles de techniques satellitaires pour observer la surface océanique et en déduire des mesures géophysiques. Les techniques passives, qui mesurent le rayonnement naturel émis par la mer dans différentes longueurs d'onde, pouvant inclure le rayonnement solaire réfléchi ; et les techniques actives (radar), qui émettent un signal et mesurent le signal reçu après réflexion sur la surface de la mer. Selon les longueurs d'onde émises et/ou reçues, l'opacité de l'atmosphère, la nébulosité ou les précipitations, les signaux enregistrés seront plus ou moins affectés.

Les principaux paramètres mesurés sont :

- Le niveau de la mer par altimétrie : L'altimétrie fournit des mesures globales, tout temps, du niveau de la mer, dont les variations sont directement reliées aux courants marins (composante « géostrophique » équilibrant la force de Coriolis). Le niveau de la mer est aussi une intégrale de la structure interne de l'océan, ce qui en fait une contrainte majeure pour la reconstruction 3D, en fonction du temps, de la circulation océanique *via* l'assimilation de ces données.
- La température de surface de la mer : C'est une variable clé pour la caractérisation fine de la variabilité, en surface, des échanges air-mer, principalement de la distribution des flux de chaleur à l'interface. C'est une variable essentielle, nécessaire aux prévisions météorologiques, et qui trace souvent la circulation océanique. Cette variable aide à la

validation et à l'assimilation des données dans les modèles océaniques. Les capteurs dans l'infrarouge offrent une excellente précision, avec des résolutions spatiales pouvant atteindre quelques centaines de mètres. Ces capteurs peuvent être opérés à partir de satellites géostationnaires pour une résolution temporelle très importante. Toutefois, opérant dans l'infrarouge, les capteurs sont limités par la couverture nuageuse et les précipitations. En utilisant de plus basses fréquences, avec des longueurs d'onde de l'ordre de plusieurs centimètres, les capteurs passifs microondes permettent des observations tout temps, au détriment d'une résolution plus grossière, de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.

- La salinité de surface : En poussant les mesures passives à des longueurs d'onde d'environ 20 cm, des capteurs micro-ondes permettent maintenant de déduire des propriétés fines des conditions diélectriques de la surface océanique afin de déduire la salinité de surface. Cette variable est essentielle pour l'étude du cycle de l'eau (bilan évaporation-précipitation, apport des fleuves), des échanges air-mer et de la dynamique de surface de l'océan.
- La couleur de l'océan : À partir de capteurs opérant dans le spectre optique, des mesures peuvent être obtenues pour déduire différents paramètres. Plus particulièrement, cela permet de suivre la chlorophylle ou encore la biomasse phytoplanctonique (premier maillon de la chaîne alimentaire), la production primaire, les matières en suspension et la matière organique dissoute. Pouvant opérer à des résolutions spatiales très fines, de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres, ces observations servent au suivi de la qualité des eaux côtières ou encore à la détection des efflorescences algales nuisibles.
- La glace de mer : Avec une répétitivité d'observation largement augmentée aux pôles, les capteurs embarqués sur les différents satellites permettent d'identifier la présence des glaces de mer. Individuellement

Quelles trajectoires pour l'océan au XXI^e siècle ?

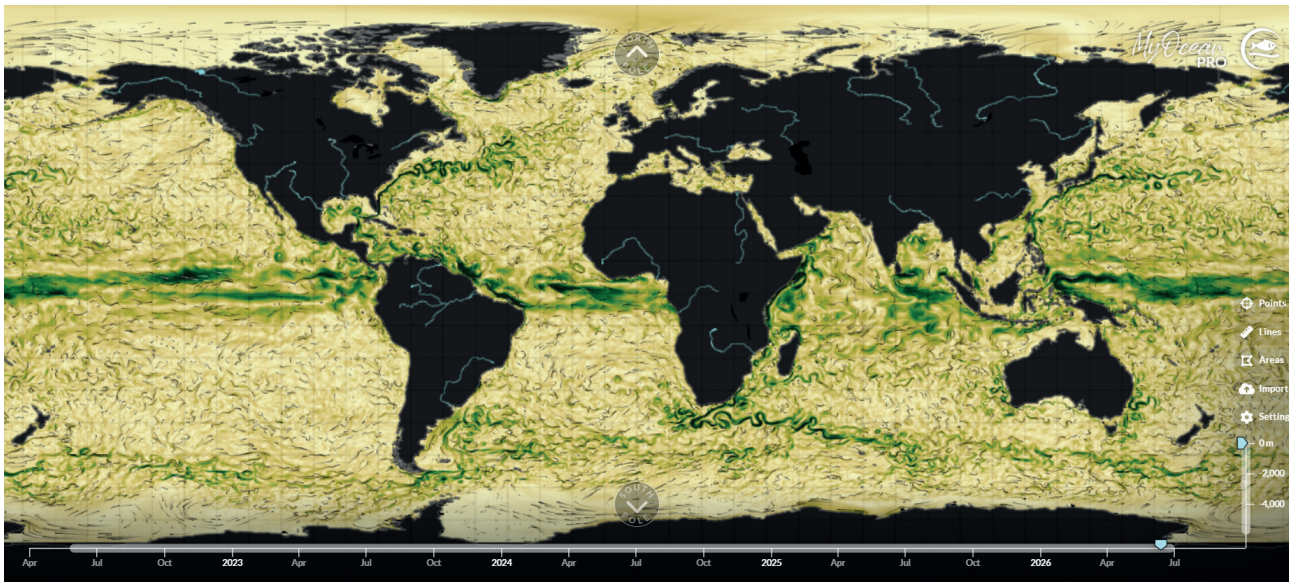


Figure 3 : Prédiction des courants de surface pour le 13 juin 2026 obtenue par le modèle global de Mercator Ocean International ayant assimilé l'ensemble des données satellites et *in situ* disponibles (Source : Mercator Ocean International).

ou en synergie, les mesures issues des radiomètres micro-ondes, des altimètres en mode SAR, des radars diffusiomètres et des radars en mode SAR, peuvent alors fournir des informations uniques sur les propriétés des glaces de mer : concentration, dérive, type de glace et épaisseur.

- Vents et vagues : Pour les états de mer, les instruments passifs et actifs sont également sensibles à l'état de rugosité de la surface de la mer, ce qui permet de restituer des estimations précises des vecteurs du vent soufflant à l'interface air-mer. Les radars SAR peuvent atteindre des résolutions spatiales de quelques mètres, et peuvent alors fournir des informations sur les vents de surface à haute résolution spatiale, ainsi que des estimations concernant les vagues, leurs hauteurs significatives et la distribution directionnelle de leurs longueurs d'onde. En exploitant cette capacité tout temps et cette haute résolution spatiale, les images issues des radars SAR peuvent permettre de détecter certains phénomènes fins comme les fronts océaniques, les ondes internes ou encore les pollutions.
- Les courants : Outre les estimations calculées à partir des variations du niveau de la mer obtenues des altimètres, des estimations des courants de surface peuvent être déduites de l'analyse de déplacements temporels captés par les instruments embarqués sur certains satellites (voir la Figure 3). À partir des satellites en orbite géostationnaire, les mesures dans le domaine optique permettent, en l'absence de nuages, de détecter et de suivre les évolutions des fronts de température. D'autres techniques, utilisant des capteurs à très haute résolution, émergent en exploitant les mesures précises, en mode interférométrique, de la dispersion des vagues ou encore les décalages Doppler induits par les mouvements conjoints des vagues et des courants.

Traiter et diffuser les données

La transition vers une océanographie intégrée, où observations, modélisation et jumeaux numériques s'articulent pour éclairer les dynamiques complexes de l'océan, repose sur un pilier peu visible mais essentiel : la gestion des données. Ce défi ne se limite pas à leur collecte ou à leur stockage. Il s'agit de construire un cycle de vie vertueux, où les données deviennent des ressources accessibles, interopérables et exploitables, au service de la recherche comme de la décision publique. Dans ce contexte, trois enjeux majeurs se dessinent : la standardisation des pratiques (principes FAIR), l'adaptation aux défis du « *big data* », et l'intégration disciplinaire, autant de leviers pour transformer des flux d'informations brutes en connaissances utiles à la compréhension et à la gestion durable de l'océan.

Les données océanographiques sont, par nature, hétérogènes, dynamiques et non reproductibles. Leur valeur réside autant dans leur contenu que dans leur traçabilité et leur pérennité. Leur gestion doit donc couvrir l'ensemble de leur parcours, depuis l'acquisition jusqu'à leur réutilisation, en passant par des étapes clés :

- Collecte et acquisition : Selon des programmes nationaux et internationaux dédiés et coordonnés ou encore lors de campagnes expérimentales particulières, les données peuvent provenir de sources variées – satellites, capteurs *in situ* (flotteurs, bouées, navires), observatoires côtiers. Des initiatives citoyennes, sciences participatives, contribuent également de plus en plus aux besoins d'acquies des données pour le suivi des états physique et biologique de l'océan. Cela peut conduire à une très grande hétérogénéité des de ces différentes sources, ce qui exige des protocoles de collecte adaptés et spécifiques pour assurer leur fiabilité initiale et permettre la suite des traitements.

- **Traitement et contrôle qualité** : Les données brutes nécessitent des corrections (détection des valeurs aberrantes, biais instrumentaux, comblement des lacunes) et une harmonisation (unités, formats) pour être exploitables. Des outils automatisés (algorithmes de validation, incluant de plus en plus l'intelligence artificielle) et manuels (expertise scientifique) sont combinés pour garantir leur robustesse.
- **Description et métadonnées** : Pour garantir leur exploitabilité, les données doivent être enrichies de métadonnées standardisées, répondant à des normes internationales, précisant le contexte de leur acquisition, les paramètres mesurés et les conditions d'accès.
- **Archivage et diffusion** : Les données doivent être pérennisées dans des entrepôts sécurisés, avec des politiques de sauvegarde et de migration technologique pour éviter leur obsolescence. Leur diffusion s'appuie sur des infrastructures ouvertes, tout en respectant les cadres réglementaires (directive INSPIRE en Europe, principes de l'*open data*) et des exigences de protection des intérêts stratégiques (ressources halieutiques ou sécurité maritime, par exemple).

Afin d'assurer une gestion durable des données et d'en maximiser leur utilisation, les données marines doivent respecter les principes FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), devenus une référence internationale :

- **Trouvables (Findable)** : Chaque jeu de données doit être identifié de manière unique, par exemple *via* un DOI (Digital Object Identifier), et référencé dans des catalogues accessibles. Les métadonnées doivent être riches et indexées pour permettre une recherche efficace, même par des utilisateurs non experts.
- **Accessibles (Accessible)** : Les données doivent être disponibles *via* des protocoles standardisés (API, services web interopérables), avec des modalités d'accès claires.
- **Interopérables (Interoperable)** : Leur format et leur structure doivent permettre leur combinaison avec d'autres jeux de données. Cela passe par l'adoption de formats standards (par exemple NetCDF pour les données océanographiques) et de vocabulaires contrôlés (taxonomies biologiques, référentiels géographiques).
- **Réutilisables (Reusable)** : Les données doivent être accompagnées de licences claires et de documentation détaillée (métadonnées, guides d'utilisation) pour en faciliter la réutilisation dans des contextes variés, de la recherche académique aux applications opérationnelles.

L'application de ces principes est essentielle pour fédérer les communautés scientifiques, éviter la duplication des efforts, et permettre des analyses intégrées, par exemple pour étudier les interactions entre physique, biogéochimie et activités humaines.

L'analyse de données marines toujours plus nombreuses et variées nécessite des technologies numé-

riques de pointe, tirant profit des dernières avancées en matière de « *big data* » et d'intelligence artificielle. Ces technologies sont développées dans des cadres fédérateurs au niveau national (Infrastructure de recherche Data Terra) et européen (EMODnet, Copernicus Marine Service, Edito – European Digital Twin Ocean) qui intègrent données, capacités de traitement et produits à destination des communautés scientifiques, des pouvoirs publics et de la société civile.

La gestion des données océanographiques n'est plus un simple support technique, mais un levier stratégique pour répondre aux défis environnementaux et socio-économiques du XXI^e siècle. En structurant leur cycle de vie autour des principes FAIR, en adaptant les infrastructures aux enjeux du « *big data* » et de l'intelligence artificielle, et en favorisant l'interdisciplinarité, la communauté scientifique transforme des flux d'informations brutes en ressources exploitables. Ces efforts sont indispensables pour alimenter les jumeaux numériques, éclairer les politiques publiques et, *in fine*, concrétiser une gestion durable des écosystèmes marins.

Prévoir et simuler l'océan : l'océanographie opérationnelle et les jumeaux numériques

C'est l'intégration de ces observations dans des modèles numériques de l'évolution 3D du système qui permet de mieux contrôler les conditions initiales et aux limites pour décrire et prévoir l'état de l'océan en temps réel : cette capacité a conduit à la mise en place de l'océanographie opérationnelle, souvent décrite comme la « météo de l'océan ». Elle vise à décrire, analyser et prévoir l'état de l'océan de manière régulière et fiable, du global au côtier. Cette démarche s'est initialement appuyée sur une approche intégrée, calquée sur la démarche déployée pour les prévisions météorologiques, combinant observations, modèles numériques et assimilation de données.

Cette approche intégrée, développée à l'échelle internationale depuis la fin des années 1990, constitue l'un des progrès majeurs de l'océanographie moderne. Ces systèmes permettent aujourd'hui de surveiller l'océan (température, salinité, courants, niveau de la mer, glace, biogéochimie, etc.) et de prévoir son évolution à différentes échelles (de quelques jours à quelques mois, selon les systèmes). Ces systèmes de prévision océanique sont au cœur de nombreuses applications : sécurité maritime, opérations *offshore*, gestion des pêches, surveillance des pollutions, prévision des événements extrêmes, services côtiers, recherche et appui aux politiques environnementales. Ils jouent également un rôle clé pour l'adaptation au changement climatique.

Les développements plus récents des JNO apportent une nouvelle dimension. Un jumeau numérique de l'océan est, idéalement, une réplique virtuelle, dynamique et évolutive de l'océan réel, construite à partir de modèles numériques et/ou d'inférences statistiques pouvant décrire l'état 3D et son évolution. Les modèles, numériques et/ou statistiques, sont et seront réguliè-

rement optimisés par les observations en s'appuyant fortement sur les techniques d'intelligence artificielle capables de mieux prendre en compte les liens et interactions entre les variables dans le temps et l'espace. La mise à disposition d'observations qualifiées et de jeux de données de simulation de référence est maintenant l'enjeu essentiel au développement des JNO. Observations et/ou sorties de modèles de référence vont remplir des fonctions clés d'apprentissage pour l'étalonnage, l'optimisation et l'initialisation de modèles, l'entraînement d'outils d'apprentissage automatique, l'évaluation et les corrections nécessaires aux informations fournies par ces JNO.

Les JNO futurs intégreront tous ces efforts, pour regrouper le plus efficacement possible les informations sur l'état de l'océan, permettre des visualisations et des évaluations rapides, voire reconnaître des situations similaires dans les catalogues d'observations et/ou de simulations, afin de conforter et d'aider aux décisions.

À partir de ces outils de simulation avancés, des estimations d'ensembles de situations possibles seront mises à disposition des chercheurs et des utilisateurs plus appliqués, et cela à relativement bas coûts de calcul. Pour différents paramètres (e.g. contenus en chaleur, niveau d'oxygène ou degré d'acidification), des scénarios et hypothèses peuvent être mieux évalués et répondre à la fois à des questions scientifiques, permettant de mieux cerner les causalités et d'identifier les indices de forts changements, et à des questions plus pratiques, concernant la gestion durable de l'océan et l'adaptation au changement climatique. À titre d'exemple, on peut se demander : Comment va évoluer le niveau de la mer le long des côtes selon les scénarios climatiques ? Quel en sera l'impact sur les infrastructures et les populations ? Comment une réduction de la pollution des rivières va-t-elle impacter la santé des écosystèmes côtiers ? Quel serait l'impact de la mise en place d'une aire marine protégée sur les ressources marines et la protection de la biodiversité marine ? Le développement d'herbiers dans les zones côtières peut-il significativement réduire les effets de l'érosion ? Quel serait l'impact et l'efficacité de techniques d'extraction du CO₂ océanique (mCDR) dans l'océan ?

L'organisation européenne

La Commission européenne (DG CNECT) a lancé « Destination Terre (DestinE) »¹ pour atteindre l'objectif ambitieux de développer l'ensemble des JN des différents compartiments du système Terre. Depuis décembre 2021, le programme DestinE est mis en œuvre conjointement avec l'Agence spatiale européenne, le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme et EUMETSAT, avec le déploiement et l'exploitation progressifs d'une plateforme principale, donnant accès aux données et à des premiers JN sur l'adaptation au changement climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes. DestinE

prévoit de progresser vers une réplique complète de la Terre en 2030.

Dans ce cadre, le programme européen Copernicus soutient ces efforts et est maintenant opérationnel depuis plus de 10 ans. Cela a permis à l'Europe de mettre en place une observation à long terme de l'état de la planète par sa composante spatiale (les missions Sentinel) et des services dédiés à chacun des composantes du système Terre, dont un service dédié à l'océan (le Copernicus Marine Service) mis en œuvre par Mercator Ocean International avec un large réseau de centres d'expertise en Europe. Les missions Sentinel garantissent un suivi opérationnel de l'état de l'océan et le Copernicus Marine Service fournit l'accès aux observations, analyses et prévisions de l'océan global et régional, synthétisant l'intégration des observations satellitaires et *in situ* dans des modèles numériques avancés.

Avec plus d'un million d'utilisateurs par an et plus d'une centaine de milliers d'abonnés, le service marin est devenu une infrastructure de référence mondiale, soutenant à la fois la recherche, les services opérationnels et l'élaboration des politiques publiques. Il constitue un socle essentiel pour le développement du JNO européen, destiné à explorer des scénarios futurs et à mieux anticiper des évolutions selon différentes hypothèses à des échelles compatibles avec la prise de décision. Une démonstration d'un premier prototype du JNO européen a été organisée lors de la conférence des Nations unies à Nice en 2025.

La France apporte une contribution majeure à cet édifice européen, que ce soit pour l'observation spatiale avec le CNES, les industriels et les laboratoires de recherche, ou l'observation *in situ* avec l'Ifremer et les organismes coopérant dans le cadre du Fr-OOS (French Ocean Observing System). Les progrès de modélisation/prévision océanique sont intégrés par Mercator Ocean International en lien avec une communauté de recherche à la pointe sur ces sujets.

Toutefois, malgré les progrès accomplis, de nombreux défis demeurent pour mieux répondre aux enjeux de surveillance et de protection de l'océan et permettre le développement d'une économie bleue durable. Il est crucial de pérenniser et renforcer les systèmes d'observation à long terme, d'améliorer les capacités de modélisation et de prévision océanique, et de tirer parti des innovations (systèmes autonomes, nouveaux capteurs, intelligence artificielle) et des avancées de la recherche. Face à ces enjeux et au rôle de premier plan joué par l'Europe pour l'étude et la protection de l'océan, la Commission européenne vient de lancer une initiative majeure, « OceanEye », qui vise à renforcer et coordonner les efforts de l'Europe sur l'observation de l'océan et à accélérer le développement et la mise en œuvre opérationnelle des jumeaux numériques. Dans une période d'instabilité politique internationale remettant en question les grands programmes d'observation et de suivi de l'océan et du climat, il est primordial que l'Europe, avec « OceanEye », affiche une nouvelle ambition forte et s'organise pour la mettre pleinement en œuvre d'ici 2030.

¹ <https://destination-earth.eu/>

Cyclones tropicaux : nouvelles capacités satellitaires, validation et réponse océanique

Par Bertrand CHAPRON et Alexis MOUCHE

Ifremer

Cet article analyse les apports récents des radars à synthèse d'ouverture (SAR) dans l'observation des cyclones tropicaux et leurs interactions avec l'océan. Contrairement aux capteurs optiques ou infrarouges, les SAR permettent d'estimer les vents de surface à haute résolution (kilométrique), y compris dans les zones les plus intenses comme l'œil du cyclone. Le programme Copernicus (Sentinel-1), complété par RADARSAT et la constellation canadienne RCM, a transformé des observations ponctuelles en bases de données globales (CyclObs), utiles à la fois pour la prévision opérationnelle et la recherche. Les validations, notamment *via* les mesures aéroportées des vols dédiés de reconnaissance, confirment la fiabilité des champs de vents restitués malgré certaines limites (pluie, artefacts). Ces données permettent aussi d'analyser la réponse océanique : mélange vertical, refroidissement de surface, remontée d'eaux plus salées et riches en nutriments, anomalies du niveau marin. La combinaison SAR, profils Argo et altimétrie moderne permet ainsi de relier quantitativement forçage atmosphérique et dynamique océanique, ouvrant la voie à des modèles couplés et à des jumeaux numériques plus performants.

Introduction

Les cyclones tropicaux sont des systèmes fortement structurés, avec des vents extrêmes s'enroulant autour d'un centre marqué, se déplaçant plutôt lentement comparativement aux tempêtes des moyennes et hautes latitudes. Pour être désigné cyclone tropical, les vents doivent être supérieurs à 33 m/s, soit environ 120 km/h. Les cyclones tropicaux les plus intenses correspondent à des vents pouvant atteindre 80 m/s, proche de 300 km/h. Ce fut le cas du cyclone Melissa, qui a ravagé la Jamaïque fin octobre 2025. Des observations fiables dans de telles conditions sont évidemment très difficiles, surtout dans le cœur du système, là où se concentrent les vents les plus forts, avec des variations spatiales très marquées, et où une partie des processus responsables de leur intensification reste encore largement inconnue des processus responsables de leur intensification. À partir de satellites en orbite géostationnaire, les capteurs optiques et infrarouges décrivent surtout l'organisation et les températures des nuages, à une altitude d'une dizaine de kilomètres au-dessus de la surface. Pour obtenir des informations et surtout des estimations des vents à la surface, seuls des capteurs passifs ou actifs sensibles à des longueurs d'ondes électromagnétiques de plusieurs centimètres peuvent être exploités. Toutefois, la plupart des systèmes actuellement disponibles à bord des satellites d'observation de la Terre ne fonctionnent qu'à des résolutions spatiales plutôt grossières, de l'ordre de 20 à 50 km. C'est très insuffisant pour caractériser l'œil du cyclone, dont le diamètre est d'environ

10 à 20 km, ainsi que le mur de cet œil, afin de déterminer précisément les rayons des vents forts. Dans ce contexte, seuls les instruments radar à synthèse d'ouverture, ou SAR, peuvent apporter ces mesures quasi instantanées de la surface de l'océan, avec une fauchée de quelques centaines de kilomètres, de jour comme de nuit, et avec une résolution allant du décimètre au kilomètre selon les produits utilisés.

À très haute résolution, les ondes électromagnétiques rétrodiffusées vers un SAR tracent les variations géométriques et cinématiques de la mer, liées aux vents, aux vagues, et aux variations fines de la couche limite atmosphérique. En travaillant à l'échelle kilométrique, il devient possible de transformer les mesures SAR en champs de vent de surface, puis d'en extraire des paramètres directement utiles : position du centre, intensité maximale, rayon du vent maximum, rayons des vents à 17 m/s (60 km/h), 25 m/s (90 km/h) et 33 m/s (120 km/h). Ces paramètres décrivent la structure du vortex et complètent les analyses opérationnelles fondées sur les satellites géostationnaires, ainsi que celles issues des autres capteurs à plus basse résolution.

Avec le programme européen Copernicus de satellites Sentinel, une première décennie de mesures issues du SAR Sentinel-1 a maintenant profondément modifié les capacités d'observation. Avant cette initiative, les mesures SAR existaient, mais restaient rares, coûteuses, hétérogènes et seulement analysées comme des cas isolés. Avec Sentinel-1, aujourd'hui complété par la constellation canadienne Radarsat Constellation Mission (RCM), les acquisitions deviennent quasi-

Quelles trajectoires pour l'océan au XXI^e siècle ?

systematiques, mieux planifiées et intégrées dans des chaînes harmonisées de traitements. Les SAR sont maintenant devenus des composants réguliers de l'observation des cyclones tropicaux.

Le premier usage est déjà opérationnel : fournir aux centres de prévision des diagnostics des vents de surface, utilisables pour ajuster les bulletins et améliorer l'estimation des différents rayons de vents dangereux. Le second usage est scientifique : construire des bases de données globales permettant de valider les algorithmes, de mieux comprendre la dynamique des cyclones, plus précisément de relier plus précisément le forçage atmosphérique à la réponse océanique, et de préparer les futurs systèmes d'assimilation ou l'élaboration de jeux numériques.

Historique des acquisitions SAR pour l'étude des cyclones

Les premières observations de cyclones par capteur SAR de cyclones datent de SEASAT, première mission spatiale NASA dédiée à l'observation de l'océan par radar. En 1978, SEASAT survole l'ouragan Iva, révélant déjà des structures précises, associées aux spirales de pluie et au centre du cyclone. Démonstration ponctuelle, SEASAT établit un principe durable : la surface

de l'océan conserve une signature radar exploitable même dans des systèmes météorologiques extrêmes.

À la fin des années 1990, la mission canadienne RADARSAT-1 marque une première étape importante avec le programme Hurricane Watch. L'enjeu est ambitieux. À partir des trajectoires prévues des cyclones, on planifie des acquisitions ciblées. À partir de 2002, la mission européenne ENVISAT apporte ensuite de nouvelles observations. Non planifiées, les mesures ne sont pas systématiques mais utiles, notamment grâce à la présence de plusieurs instruments à bord du satellite. Les acquisitions ENVISAT SAR peuvent être mises en regard d'observations optiques (cf. Figure 1) ou radiométriques. Avec cette complémentarité, il est bien démontré que le SAR capte bien la surface de l'océan, alors que les instruments visibles ou infrarouges décrivent l'organisation nuageuse et la convection. Les deux lectures ne sont pas redondantes ; elles renseignent des niveaux différents du même système.

Un véritable tournant arrive avec le SAR canadien embarqué sur RADARSAT-2, lancé en 2007. Cet instrument acquiert des signaux avec divers modes de polarisation. Aux vents les plus forts, les signaux co-polarisés donnent des réponses intenses, mais tendent à saturer lorsque le vent dépasse 35 m/s. C'est en utilisant la polarisation croisée que les plus grandes sensibilités à

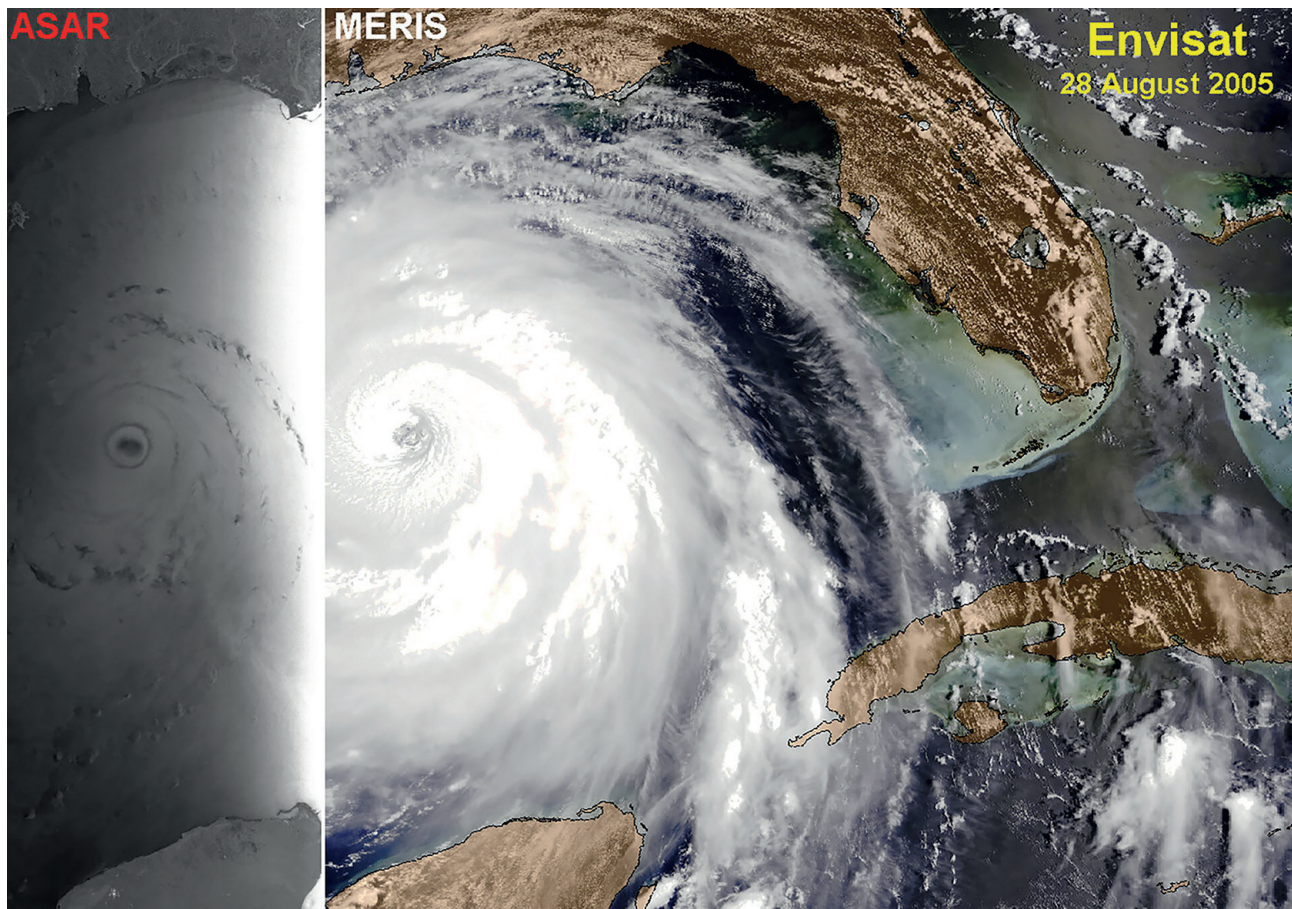


Figure 1 : Deux vues complémentaires de l'ouragan Katrina ont été acquises le 28 août 2005 par les instruments d'Envisat. L'image radar ASAR en mode Wide Swath montre la signature du champ de vent à la surface de l'océan. L'image optique MERIS en mode Reduced Resolution révèle les structures nuageuses spiralées autour de l'œil, avec le mur de l'œil visible (ESA, 2005).

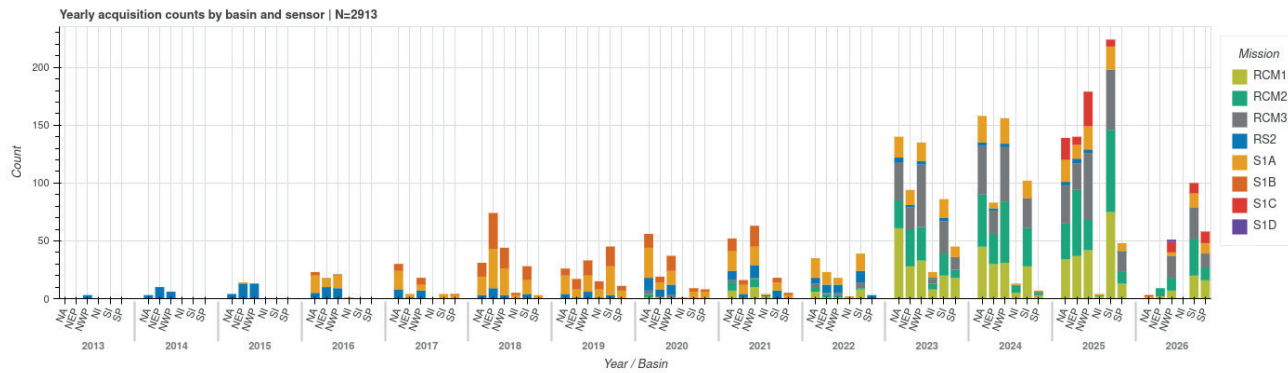


Figure 2 : Distribution des données acquises avec les radars à ouverture de synthèse en bande C Européens et Canadiens sur des cyclones tropicaux depuis 2015 et présentes dans la base de données CyclObs de l'Ifremer.

ces vents sont obtenues. Cette propriété est évidemment centrale pour les cyclones majeurs.

Les Sentinel-1 du programme Copernicus bénéficient de cette capacité et apportent une rupture d'échelle. Avec Sentinel-1A en 2014 puis Sentinel-1B en 2016, aujourd'hui Sentinel-1C et 1D, l'Europe fournit des données ouvertes, régulières et systématiquement traitées. La politique d'accès libre change la dynamique de recherche : les mêmes algorithmes peuvent être testés sur de nombreux cas, les comparaisons avec des mesures indépendantes deviennent plus robustes, et les produits dérivés sont diffusés à une communauté opérationnelle plus large.

Aujourd'hui renforcées par la constellation canadienne RCM formée de trois satellites, les observations SAR ne fournissent plus des images de cyclones isolés. Les acquisitions sont désormais quasi-systématiques et forment des bases de données enrichies, multi-bassins et pluriannuelles. Ces bases de données commencent à devenir suffisamment denses pour analyser précisément la structure des vents, mieux suivre leurs évolutions, alimenter des usages opérationnels, et surtout mieux comprendre les principes d'intensification de ces systèmes.

La base de données Ifremer-CyclObs

Observer un cyclone par SAR demande toutefois une stratégie spécifique. En effet, les satellites embarquant ces SAR sont en orbite héliosynchrone à relativement basse altitude au-dessus de la Terre, se déplaçant à 7 km/s, avec une revisite temporelle limitée. Les temps d'acquisition sont encore contraints, de l'ordre de quelques dizaines de minutes le long d'une orbite qui prend quant à elle environ une centaine de minutes. Enfin, plusieurs modes d'acquisitions sont souvent incompatibles entre eux. Outre d'autres priorités de la mission, les acquisitions doivent donc être planifiées en fonction de la trajectoire prévue du cyclone, de la largeur de fauchée de l'instrument, et de la probabilité de capturer au mieux son centre.

Pour Sentinel-1, cette stratégie dédiée d'acquisitions est portée par l'expérience SHOC, Satellite Hurricane Observation Campaign. Les prévisions de trajectoires

sont fournies par le Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT). Cette expérience reprend l'esprit original de Hurricane Watch, mais avec une différence majeure : la disponibilité ouverte et régulière des données Sentinel-1. Après acquisitions, les mesures sont alors intégrées dans une chaîne plus continue, même si les couvertures spatiale et temporelle restent irrégulières. L'objectif n'est bien entendu pas de remplacer les autres observations, mais d'ajouter des instantanés très résolus des conditions à la surface au cours de la vie du cyclone.

Depuis 2023, la montée en puissance de la constellation canadienne RCM augmente très favorablement l'échantillonnage temporel. Le nombre d'acquisitions disponibles a été largement multiplié, avec plus de 500 observations SAR de cyclones en 2024, contre moins de 100 en 2016. Le nombre moyen d'observations par cyclone est passé d'environ 3–4 en 2018 à environ 6–7 en 2024. En parallèle, la part des cyclones non observés diminue nettement.

Ces acquisitions alimentent deux bases de données principales. CyclObs, porté par Ifremer, est orienté vers l'archivage scientifique, l'harmonisation multi-missions et l'exploitation de long terme. Le service météorologique américain, NOAA, vise davantage le temps réel et les besoins des prévisionnistes. Les deux approches convergent : produire des champs de vent de surface à résolution kilométrique et des diagnostics harmonisés de la structure des vortex à partir de scènes SAR issues de missions différentes.

La base CyclObs réunit les données Sentinel-1, RADARSAT-2 et de la constellation canadienne RCM, avec plusieurs modes, plusieurs polarisations et des caractéristiques instrumentales différentes. Malgré ces différences, de résolution native, de taille des fauchées ou encore de calibration, l'ensemble de ces mesures réalisées par plusieurs missions montrent une cohérence remarquable des vents estimés, validant le principe d'une constellation virtuelle multi-agences capable de fournir des jeux de données cohérents, globaux et ouverts aux différents usages. La Figure 2 présente le nombre de données par an et par bassin (NA, Atlantique Nord ; NEP Pacifique Nord-Est ; NWP Pacifique Nord-Ouest ; NI, Indien Nord ; SI, Indien Sud ; SP, Pacifique

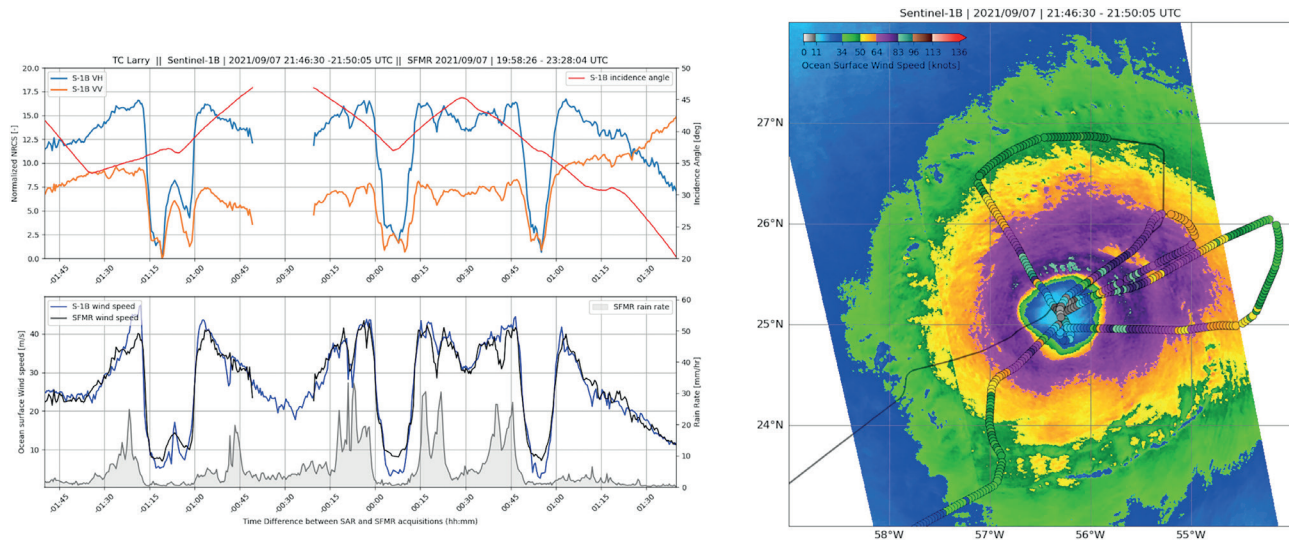


Figure 3 : Exemple de colocalisation et de comparaison entre les mesures SFMR (vent de surface océanique et taux de pluie) et les vitesses de vent de surface estimées par SAR à partir de Sentinel-1B, le 7 septembre 2021, lors du cyclone tropical Larry.

Sud) pour chacune des missions spatiales contribuant à la base de données CyclObs.

Afin de restituer un vecteur vent à la surface de la mer à chaque pixel SAR, plusieurs méthodologies algorithmiques sont alors utilisées : ajouter une information externe, exploiter l'organisation structurale que les mesures à très haute résolution spatiale permettent, et prendre en compte l'ensemble des signaux complémentaires que le radar peut capter.

Dans la chaîne Ifremer-CyclObs, les canaux co-polarisés et en polarisation croisée sont combinés, avec un a priori de la structure générale du vent. Cela permet de lever l'ambiguïté directionnelle, tandis que les deux polarisations contraignent la restitution des vitesses. Le service NOAA adopte une approche plus directe pour le temps quasi réel, fondée principalement sur la polarisation croisée. Ce choix est adapté aux besoins opérationnels, centrés sur les vents de force tempête et au-delà, typiquement supérieurs à 17 m/s (60 km/h). Dans ces régimes, les signaux en polarisation croisée sont suffisamment sensibles, avec une dépendance limitée à la direction du vent. La méthode est plus simple à déployer, et adaptée à la diffusion rapide vers les centres de prévision.

Une fois les champs de vent de surface restitués, d'autres algorithmes sont appliqués pour définir la structure du vortex sont appliqués. Le centre du cyclone est recherché à partir des zones de vents faibles, entourées par les vents les plus forts. Les valeurs maximales des vents, V_{max} , et de leurs rayons, R_{max} , sont estimés en suivant les profils des vents depuis le centre. Les autres rayons, qui correspondent aux extensions maximales des zones atteignant différents seuils, sont également déterminés, généralement par quadrant géographique. Ces paramètres résument la dangerosité spatiale du cyclone, au-delà de sa seule intensité maximale.

La qualité de ces paramètres dépend des scènes SAR acquises. Un cyclone mal centré dans la fauchée, un

œil partiellement coupé, une proximité des côtes, des zones de précipitations intenses ou des artefacts instrumentaux peuvent perturber ces estimations. Les produits sont tous accompagnés d'indicateurs de qualité, essentiels lorsque les diagnostics sont utilisés par des non-spécialistes du SAR et/ou intégrés dans des procédures opérationnelles.

Validation et limites

Comment valider les vents restitués par les mesures SAR, spécifiquement sous les cyclones ? Le SAR fournit une mesure instantanée, à la fois à très haute résolution et sur une fauchée large de la structure du cyclone. Les mesures locales les plus fiables sont aujourd'hui principalement issues des vols d'avions. Ce sont les seules données disponibles de référence. Toutefois, elles ne peuvent fournir des estimations que le long de transects parcourus par l'avion. Les instruments embarqués sur ces avions ne mesurent pas exactement les mêmes grandeurs, ni à la même résolution, ni au même instant. Chaque comparaison doit donc tenir compte des différences d'échelle, du déplacement du cyclone et de la représentativité physique des mesures.

Aujourd'hui, la référence principale est obtenue à partir du radiomètre aéroporté multi-fréquences, dit SFMR, opéré par les équipes spécialistes de la NOAA, et utilisé lors des vols de reconnaissances cycloniques. Cet instrument permet de bien séparer les contributions atmosphériques et surfaciques pour estimer la vitesse des vents en surface, le long de la trajectoire de l'avion. Cela fournit des données suffisamment résolues pour être colocalisées avec les produits SAR. L'exemple de l'ouragan Larry en 2021 (cf. Figure 3) illustre la robustesse de cette comparaison : après correction du déplacement du cyclone, le signal radar, en particulier en polarisation croisée, retrace assez parfaitement les variations du vent SFMR.

Pour des colocalisations temporelles proches, les statistiques de validation sont maintenant robustes. Les vents SAR présentent un biais très faible, un écart-type de moins de 5 m/s, et une corrélation de 0,97. Sur un ensemble plus large de plusieurs centaines d'acquisitions SAR colocalisées avec SFMR dans l'Atlantique Nord ou près d'Hawaï, les performances restent élevées, avec des corrélations proches d'au moins 0,9 selon la fenêtre temporelle retenue. Ces résultats confirment la capacité unique du SAR à restituer des vents très forts à l'échelle kilométrique.

Les comparaisons avec les mesures des capteurs passifs, tels que les radiomètres des missions satellitaires européennes SMOS ou américaines SMAP, peuvent apporter beaucoup plus de points de croisements, mais avec une limite importante : leur résolution, de l'ordre de 40 à 50 km, ne permet pas d'évaluer directement l'œil ou le mur de l'œil. Ces instruments sont donc plus utiles pour vérifier la cohérence des vents SAR après dégradation spatiale. Lorsque les vents SAR sont effectivement lissés à une résolution comparable, les statistiques restent parfaitement cohérentes. Cela renforce la capacité de suivi multi-capteurs des cyclones, hors des structures les plus fines.

Des limites restent encore importantes. La pluie peut atténuer ou modifier localement la rétrodiffusion des signaux, avec des effets différents selon les polarisations et des fréquences électromagnétiques exploitées. Des signatures hydro-météoriques en altitude peuvent également conduire à des estimations de vents suspects, sans signature géophysique évidente, ce qui rend une exploitation purement automatique encore difficile.

Les besoins opérationnels convergent donc vers l'élaboration de produits méticuleusement analysés. Les champs restitués par les mesures des différents satellites doivent être systématiquement renseignés, accompagnés d'indices de qualité pouvant caractériser les zones affectées par la pluie, les artefacts instrumentaux ou une faible confiance dans les résultats d'inversion. Cette information est indispensable pour les prévisionnistes, qui doivent pondérer rapidement les informations issues des différentes acquisitions SAR par rapport aux autres sources disponibles. Elle est tout aussi importante pour les études statistiques, afin d'éviter que des signatures non géophysiques ne biaisent les analyses.

Les réponses océaniques aux passages des cyclones

La réponse océanique au passage d'un cyclone est souvent très marquée. En effet, les vents cycloniques peuvent avoir un impact très localisé et fort sur l'océan supérieur. Avec ces forçages extrêmes qui évoluent en intensité et direction lors de son passage, un cyclone va provoquer des mouvements verticaux très intenses, de plusieurs centaines de mètres sur la colonne d'eau. Ces mouvements s'accompagnent alors de mélanges entre couches superficielles et couches plus profondes. Ce mélange conduit à un refroidissement très visible

à la surface, et/ou à des remontées de la salinité et de nutriments pour des réponses biologiques importantes. Tout cela se traduit également par une anomalie très localisée du niveau de la mer : une tranchée de plusieurs dizaines de centimètre peut se creuser au passage du cyclone. Cette anomalie est une signature assez unique et renseigne sur la réponse de l'océan au forçage atmosphérique. Pour l'interpréter correctement, il faut alors connaître à la fois la structure du vent, la vitesse de déplacement du cyclone et la stratification préexistante de l'océan.

Le SAR apporte maintenant le forçage atmosphérique à haute résolution. Il fournit V_{max} , R_{max} et la distribution spatiale des vents près du cœur. L'analyse des trajectoires permet de déterminer la vitesse de translation. La structure de l'intérieur de l'océan bénéficie de la forte augmentation des mesures disponibles de profils verticaux obtenus par les instruments in situ du réseau Argo. Ces profils permettent d'accéder à la distribution verticale, sur le premier millier de mètres à l'intérieur de l'océan, de la température et de la salinité, pour donner une estimation précise de la stratification océanique avant le passage du cyclone. À partir de cette estimation, la fréquence locale dite de Brunt-Väisälä est obtenue. Cette fréquence permet d'anticiper la réponse (force d'Archimède) de l'océan au forçage extrême subit au passage du cyclone. Mentionnée précédemment, cette réponse se caractérise par une baisse du niveau de l'océan, juste localisée avec le centre du cyclone. Ce creux va ensuite pouvoir être mesuré et suivi par les instruments de précisions centimétriques que sont les altimètres actuellement embarqués sur différent satellites. La signature océanique d'un cyclone relie donc trois éléments physiques : le forçage de surface, la structure verticale de l'océan et la réponse dynamique mesurée à la surface. Une loi d'échelle peut être déduite de la combinaison de ces paramètres.

Le cas du typhon Mawar illustre cette approche (cf. Figure 4). Le cyclone est observé par SAR le 26 mai 2023 vers 20:52 UTC. À ce moment, les vents SAR donnent une intensité maximale proche de 71 m/s et un R_{max} d'environ 37,5 km. La vitesse de translation est d'environ 7 m/s. Ainsi, le forçage intense dure-t-il environ 3 h. Des profils Argo situés dans l'environnement pré-tempête indiquent une stratification caractérisée par une fréquence de Brunt-Väisälä proche de 0,0133 s⁻¹ (période d'environ 10 mn). Un altimètre, croisant le sillage du cyclone 2 jours après, observe ensuite un creux de hauteur de mer d'environ 28 cm dans le sillage de Mawar, d'une largeur de 80 km.

La loi d'échelle relie cette dépression du niveau de mer à V_{max} , R_{max} , à la vitesse de translation et à la stratification. Pour Mawar, cette loi prédit un creux d'environ 30 cm. L'accord avec les 28 cm mesurés par l'altimétrie est donc très bon. Ce résultat est important car il montre que la description précise du cœur du cyclone par un SAR n'est pas seulement utile pour la météorologie. Elle permet aussi de quantifier la réponse de l'océan supérieur, donc de mieux comprendre l'intensité du couplage air-mer pendant et après le passage du cyclone.

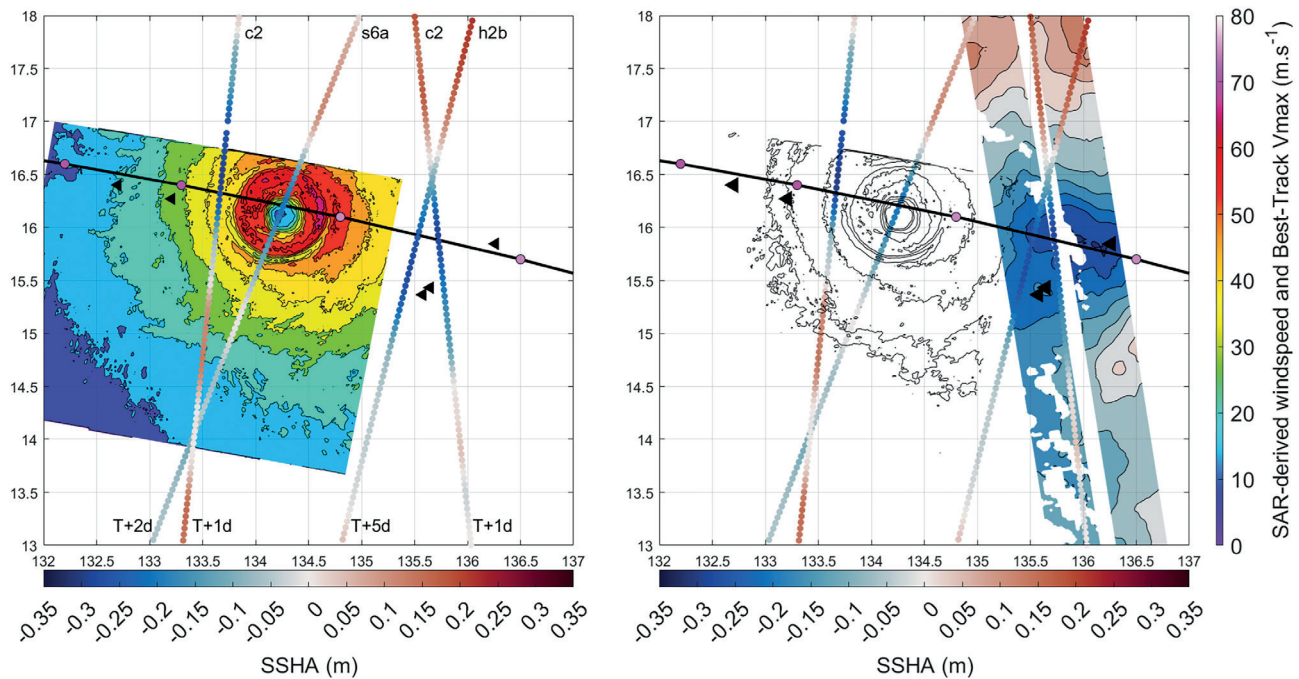


Figure 4 : Illustration de l'analyse du sillage du cyclone tropical Mawar, centrée sur une acquisition SAR RCM du 26 mai 2023 à 20:52 UTC. À gauche : cadre multi-plateforme avec des altimètres classiques. À droite : nouveau cadre intégrant les mesures de topographie de surface océanique de l'altimètre 2D KaRIn de SWOT. La mesure SWOT présentée a été acquise deux jours après le passage de Mawar – c'est-à-dire après l'acquisition SAR – lorsque la réponse maximale de SSHA est observée. Les triangles noirs indiquent la distribution des flotteurs Argo. Les altimètres utilisés sont CryoSat-2 (c2), Sentinel-6A (s6a) et Haiyang-2B (h2b).

Avec l'arrivée de la mission NASA/CNES SWOT, la nature des capacités des mesures altimétriques de l'océan a également largement changée. Les altimètres classiques, déjà très précis, ne pouvaient mesurer les niveaux de la mer que le long de traces fines, juste sous le satellite défilant. SWOT, avec l'instrument KaRIN, fournit une mesure maintenant bidimensionnelle à partir de ces deux fauchées de largeurs d'environ 80 km, de part et d'autre de la trajectoire du satellite. Cette capacité est décisive pour l'analyse des sillages et tranchées altimétriques que les cyclones laissent dans leurs passages. Avec SWOT, la mesure ne se résume plus à un profil. Dans le cas de Mawar, SWOT cartographie la réponse deux jours après le passage, au moment où l'anomalie maximale est détectée.

La mesure SWOT présente une anomalie d'environ 31 cm, cohérente avec la loi d'échelle et avec l'altimétrie classique. Avec une mesure bidimensionnelle, une comparaison peut être réalisée avec la structure du vortex estimée par SAR, en particulier Rmax et autres rayons. Pour le cas Mawar, la largeur du sillage est d'environ deux fois Rmax. Cette proximité avec d'autres métriques dynamiques suggère un lien direct entre la structure du vent près du cœur, la force et la forme de la réponse océanique.

La synergie SAR-Argo-SWOT ouvre bien une stratégie nouvelle. Le SAR décrit le forçage atmosphérique à l'échelle pertinente pour caractériser la structure des vents les plus intenses du cyclone. Argo fournit la stratification qui conditionne la réponse. SWOT révèle la structure spatiale de la réponse océanique. L'ensemble permet de tester des lois d'échelle, d'évaluer les

modèles couplés et de documenter des processus difficiles à observer autrement : les vitesses verticales à l'intérieur de l'océan.

Perspectives

De futures missions vont renforcer ces nouvelles capacités d'observations. La mission japonaise ALOS-4 et européenne ROSE-L, toutes deux embarqueront des SAR opérant à une longueur d'onde électromagnétique de 20 cm. À cette longueur d'onde, l'atmosphère sera totalement transparente, et les observations ne souffriront plus dans les cas de précipitations intenses. Ces deux missions participeront à encore améliorer l'échantillonnage temporel. La nouvelle mission indo-américaine NISAR apportera des observations également ouvertes, mais une stratégie d'observations des cyclones n'est pas encore mise en place.

Clairement, la mission Copernicus ROSE-L va permettre une synergie européenne unique, utilisant conjointement les mesures avec celles des Sentinel-1, soit par observations quasi simultanées, soit par observations décalées dans le temps. Dans le premier cas, les instruments SAT fonctionnant à deux fréquences différentes vont permettre d'encore mieux contraindre la restitution des paramètres géophysiques. Dans le second, l'échantillonnage temporel sera amélioré, ce qui est particulièrement utile pour les phases d'intensification rapide.

Une autre rupture est également en vue avec la mission Earth Explorer 10 Harmony de l'agence spatiale européenne. Harmony est une mission consti-

tuée de 2 satellites compagnons, pour offrir une configuration bi-statique autour de Sentinel-1D. Le SAR de Sentinel-1D jouera le rôle d'émetteur, et après réflexions sur la surface, les signaux seront captés par les antennes embarquées sur les 2 satellites compagnons. Avec cette configuration bi-statique, plusieurs géométries de visée simultanées seront disponibles, favorables à des restitutions encore plus précises des directions des vents et des vagues, permettant également d'obtenir des mesures Doppler pour essayer de restituer les courants.

Tous ces développements s'inscrivent dans le contexte de la préparation de jumeaux numériques et d'approches plus directement gouvernées par l'analyse des données pour la prévision des événements extrêmes. En particulier, les cyclones ne peuvent pas être représentés correctement sans résoudre des processus de l'ordre du kilomètre, voire de quelques centaines de mètres dans la couche limite atmosphérique couplée à la couche limite océanique. Les observations réalisées à très haute résolution sont absolument essentielles et pourront fournir les informations nécessaires à l'amélioration des modèles numériques. Toutes les données accumulées constitueront des jeux de données de référence pour entraîner, tester et contraindre ces systèmes de prévision. La valeur du SAR ne se limite donc pas au produit instantané ; elle réside aussi dans la richesse des fouilles dans les bases de données, et dans sa capacité à documenter beaucoup plus précisément des processus rarement observés.

Conclusion

Les instruments SAR sont devenus des composants structurants de l'observation des cyclones tropicaux. En une décennie, l'accès ouvert aux données Sentinel-1, la planification dédiée des acquisitions et l'intégration de plusieurs missions ont transformé des observations auparavant ponctuelles en une base globale et directement exploitable de données qualifiées. Les produits dérivés fournissent des champs de vent à résolution kilométrique et des paramètres de la structure du vortex, utiles pour la prévision, la réanalyse et la recherche.

Les efforts de validation compilent les croisements avec les mesures réalisées à partir des avions de reconnaissance. Cela permet d'améliorer la fiabilité des estimations et permettre de documenter les variations des champs de vents jusqu'aux centres des cyclones. Ces distributions radiales sont particulièrement précieuses, car cela reste difficile voire impossible à estimer avec les capteurs plus grossiers embarqués sur les autres satellites d'observations de la Terre. Les centres opérationnels utilisent maintenant régulièrement les observations SAR pour ajuster l'intensité, les rayons des vents les plus forts, et les analyses post-tempête. Les limites sont bien identifiées : pluie, bruit instrumental, hétérogénéité entre missions et besoin d'indicateur de qualité plus robustes.

Au passage d'un cyclone, l'océan subit un forçage intense sur des durées relativement courtes. Cela produit des échanges verticaux qui redistribue température, salinité, et nutriments sur la colonne d'eau.

Cela conduit à une signature marquée et souvent très persistante, de plusieurs semaines, sur le niveau de la mer, avec des creux d'amplitudes souvent supérieures à 20 cm. En combinant la structure du vent estimée par SAR, la stratification de l'intérieur de l'océan fournie par les profileurs Argo, et la réponse altimétrique observée après le passage du cyclone, il devient possible de relier quantitativement le forçage atmosphérique à la réponse de l'océan supérieur. Avec la nouvelle génération d'instruments capables d'imager précisément les niveaux de l'océan, les analyses peuvent maintenant parfaitement cartographier les sillages après les passages des cyclones. Cela ouvre des perspectives vers des analyses plus complètes, pouvant utiliser diverses modalités d'observations pour documenter et comprendre les interactions des systèmes atmosphériques intenses avec les couches supérieures de l'océan.

En synergie, l'ensemble de ces observations sert maintenant de socle pour une meilleure identification et compréhension des différents processus pouvant causer l'intensification rapide des cyclones, avec des études mieux ciblées des interactions air-mer en conditions extrêmes. La construction de ces bases de données est également essentielle pour l'élaboration de futurs jumeaux numériques. Avec des accès simplifiés aux sorties de simulations numériques, les données favoriseront la mise en œuvre de méthodes d'apprentissage profond et d'intelligence artificielle. Garanties par le cadre européen Copernicus, les prochaines missions renforceront cette capacité, en poursuivant les travaux de recherche et l'intégration systématique de ces données avec les autres observations océaniques et atmosphériques. Des jumeaux numériques futurs intégreront tous ces efforts, pour regrouper vite l'ensemble des informations, permettre visualisation et rapides évaluations, possiblement pour reconnaître des situations similaires dans les catalogues d'observations et/ou de simulations, afin de conforter et aider aux décisions.

Risques et opportunités de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer

Par **Gonéri LE COZANNET**

Chercheur au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) au sein de l'unité « Risques côtiers et changement climatique »

Mirna BADILLO-INTERIANO

Doctorante en géographie au BRGM, spécialisée dans l'évaluation des risques climatiques en milieu insulaire

Cécile CAPDERREY

Chef de projet au BRGM et titulaire d'un doctorat en écologie

Angélique MELET

Océanographe physicienne à Mercator Ocean, spécialisée dans l'étude de l'élévation du niveau de la mer et des projections climatiques régionales océaniques

& Rémi THIÉBLEMONT

Chercheur au BRGM au sein de l'unité « Risques côtiers et changement climatique »

Il est aujourd'hui bien établi que l'élévation du niveau de la mer se poursuivra pendant des siècles jusqu'à atteindre plusieurs mètres. La vitesse du phénomène dépendra des niveaux de réchauffement climatique atteints et de la sensibilité des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique à ce réchauffement.

Il s'agit donc bien d'un bouleversement majeur à venir pour les littoraux, y compris en France hexagonale et d'Outre-mer. Identifiée à juste titre comme un risque pour les submersions marines, le recul du trait de côte et la salinisation des estuaires et des aquifères côtiers, l'élévation du niveau de la mer présente néanmoins également une opportunité : celle de conduire des recompositions territoriales rendues inéluctables de manière à mieux gérer les espaces littoraux, en restaurant des espaces pour les sédiments et les écosystèmes.

Risques côtiers et élévation du niveau de la mer

En 2010, la tempête Xynthia a causé la mort d'une cinquantaine de personnes. Les submersions marines associées ont également causé des pertes assurées estimées à 750 millions d'euros. Le choc causé par cet événement a entraîné une accélération dans la réalisation des plans de prévention des risques littoraux en France. La succession de tempêtes de 2013-2014, quant à elle, a rappelé l'importance et la soudaineté des phénomènes d'érosion côtière et leurs conséquences pour les habitations situées sur le trait de côte.

Loin d'être un sujet cantonné aux seules communes littorales, les risques côtiers concernent l'ensemble de la société : la moitié du commerce mondial en valeur transite par des ports maritimes ; les littoraux consti-

tuent la première destination touristique en France ; enfin, lorsque les risques côtiers se concrétisent sous la forme de pertes et dommages, la question de leur indemnisation concerne tous les Français, que ce soit à travers le système d'indemnisation des catastrophes naturelles ou d'autres mécanismes légaux et financiers.

L'élévation du niveau de la mer fait irruption dans ce paysage déjà très complexe. Depuis les premières études sur l'élévation du niveau marin global mobilisant les marégraphes installés dans les ports dans les années 1940 jusqu'à l'attribution de chacune de ces observations à ses causes (Von Hardenberg, 2024 ; Cazenave *et al.*, 2026), un premier fait majeur est le constat d'une accélération du niveau marin : de 2 mm/an à la fin du XX^e siècle, elle est estimée à 4,3 mm/an sur la décennie 2013-2023 (Von Schuckman *et al.*, 2024). Cette accélération est bien expliquée par le

changement climatique et notamment, depuis le début des années 2000, par l'amorce de la fonte des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique. Aujourd'hui, l'élévation du niveau de la mer est bien comprise et expliquée. Ceci a été rendue possible par le développement de moyens d'observation en mer, sur les littoraux et en orbite autour de la Terre, tels que les bouées Argo, les marégraphes et les GPS côtiers ou l'altimétrie et le radar satellitaire. Ces moyens d'observation, actuellement fragilisés par les bouleversements géopolitiques en cours, notamment aux États-Unis, ont permis de développer une capacité à réaliser des projections de niveau marin¹.

Le principe des projections de niveau marin consiste à modéliser l'expansion thermique des océans, la fonte de glaciers de montagne et des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique ainsi que des contributions plus modestes, liées notamment à l'exploitation des eaux souterraines. Une contribution très importante est l'expansion thermique des océans qui pourrait représenter un tiers de l'élévation du niveau marin vers la fin du XXI^e siècle dans un scénario à 3°C de réchauffement global. L'incertitude principale pesant sur les scénarios de niveau marin est due aux inlandsis du Groenland et de l'Antarctique dont la fonte totale représenterait respectivement 7 et 58 m d'élévation du niveau marin, et dont les mécanismes de fonte et leur vitesse font l'objet de recherches.

Depuis la fin des années 1980, les projections indiquent une élévation du niveau de la mer de l'ordre de 50 cm à 1 m vers la fin du XXI^e siècle, mais sans exclure une élévation plus rapide selon la vitesse de fonte des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique (voir la Figure 1). Ces projections montrent également, sans ambiguïté, que le niveau de la mer continuera à s'élever pendant des siècles (Fox-Kemper *et al.*, 2021). La question n'est donc pas tant de savoir quelle sera l'élévation du niveau marin en 2100 que d'anticiper les échéances où les seuils de 60 cm, 1 m ou 2 m seront dépassés.

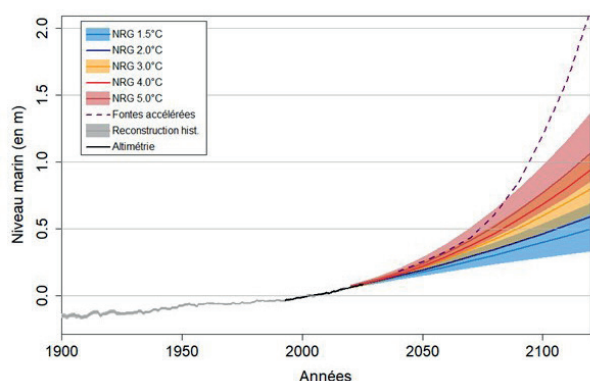


Figure 1 : Observations et projections d'élévation du niveau marin global pour différents niveaux de réchauffement par rapport à la période préindustrielle (d'après Le Cozannet *et al.*, 2025). Lecture : NRG = Niveau de Réchauffement Global.

¹ Cette fragilisation se manifeste entre autres par des coupes budgétaires d'agences telles que la NASA ou la NOAA compromettant leurs programmes d'observations et leurs contributions aux efforts internationaux d'observation de l'océan.

Les variations du niveau marin ne sont pas uniformes à l'échelle de la planète et certaines régions verront ces seuils dépassés plus tôt que d'autres. Pour la plupart des régions habitées, les projections régionales ne s'écartent néanmoins que de +/- 20 % des projections globales. Dans les régions affectées par un affaissement du sol, telles que de nombreuses villes du Sud-Est asiatique, mais aussi des côtes du nord de l'Adriatique en Europe ou du golfe du Mexique aux États-Unis, l'élévation relative du niveau marin est beaucoup plus rapide, des subsidences de l'ordre de quelques millimètres à un centimètre par an y étant observées.

Quelles que soient les incertitudes, la certitude que l'élévation du niveau marin se poursuivra pendant des siècles jusqu'à atteindre plusieurs mètres implique que les littoraux, dans la plupart des régions du monde, y-compris en France hexagonale et d'Outre-mer, sont à la veille de transformations majeures.

Options d'adaptation face à l'élévation du niveau marin

Dans le passé, les zones côtières européennes ont été aménagées avant tout pour des besoins du développement militaire, urbain, portuaire, industriel, économique, touristique, souvent avec une démarche consistant à fixer le trait de côte, mais également avec une préoccupation grandissante en ce qui concerne la préservation des paysages et des écosystèmes (voir la Figure 2). Depuis le début des années 2000, les effets de plus en plus marqués du changement climatique appellent des réponses d'adaptation. La première d'entre elles consiste à éviter d'aggraver l'exposition aux risques littoraux en limitant l'urbanisation des zones exposées aux submersions marines et à l'érosion (Cooley *et al.*, 2022). Pour les infrastructures existantes, les options disponibles sont multiples, les principales consistant à protéger les enjeux des aléas côtiers, à réduire la vulnérabilité de ces enjeux ou à les relocaliser.

Les mesures de prévention des risques qui ont accompagné le développement des zones littorales en France et en Europe ont fait le plus souvent appel à l'ingénierie côtière et à la protection contre les aléas côtiers, tels que les brise-lames, épis, enrochements, digues, voire barrières estuariennes. Bien souvent, des dunes et d'autres écosystèmes protègent également des enjeux.

Le développement des infrastructures de protection côtières s'accompagne d'un certain nombre de difficultés qui croissent avec le temps : les infrastructures de protection reportent des déficits sédimentaires sur les sites côtiers adjacents, qui, à leur tour voient les risques s'aggraver. Ces infrastructures représentent un coût important, que ce soit lors de la construction ou pour l'entretien, qui constitue un sujet de friction entre l'État et les collectivités en France. L'existence de protections favorise le développement urbain en arrière des aménagements, ce qui verrouille la stratégie d'adaptation locale vers toujours plus de protection, quel qu'en soit le coût.

À l'opposé, une autre stratégie d'adaptation peut consister à relocaliser les enjeux exposés. Cette

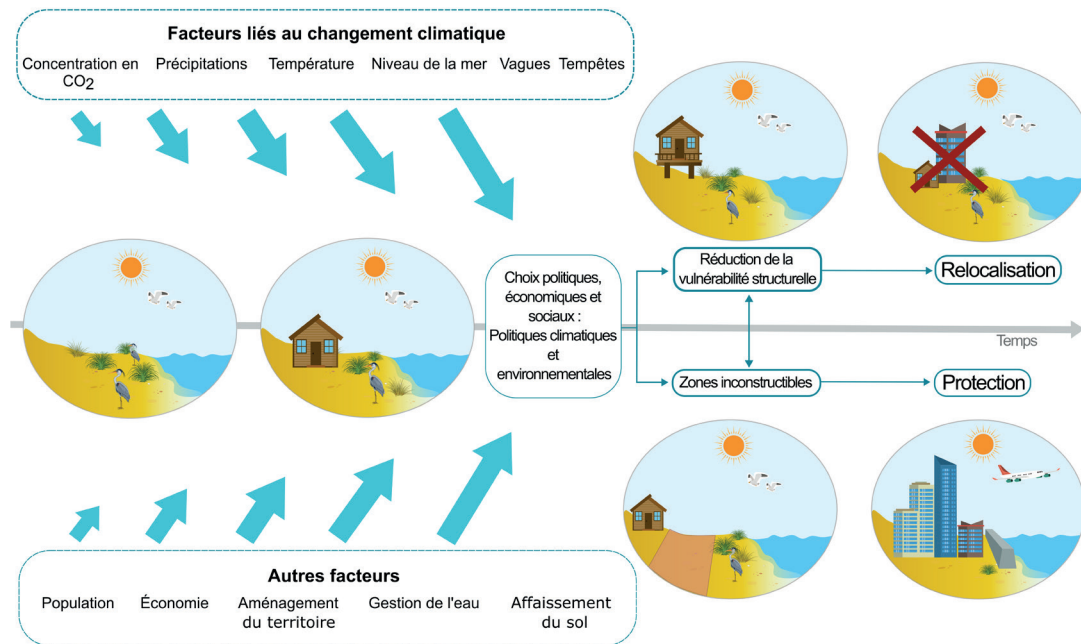


Figure 2 : Chemins d'adaptation idéalisés pour l'adaptation côtière (inspiré de Brown *et al.*, 2014).

approche part du constat, reconnu en France dans la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, qu'il n'est pas possible de protéger partout. Les relocalisations s'accompagnent assez souvent de solutions fondées sur la nature, consistant notamment à recréer des espaces pour les sédiments, les écosystèmes, les épanchements de crue et les submersions marines. Les relocalisations sont complexes à organiser sur le plan social, juridique et politique. Elles requièrent souvent la mobilisation de moyens financiers importants afin de racheter du foncier (Haut Conseil pour le Climat, 2026). En revanche, elles ne reportent pas les décisions difficiles pour les générations futures et apportent des bénéfices immédiats pour la biodiversité.

Une autre stratégie consiste à réduire la vulnérabilité des bâtiments exposés aux submersions marines, par exemple *via* des rehaussements de planchers ou la création de refuges en hauteur pour protéger les vies humaines lors des tempêtes (Pasquier *et al.*, 2026). Cette approche présente l'intérêt de nécessiter des investissements relativement modestes, comparés à la protection ou aux relocalisations et de ne pas verrouiller définitivement les choix d'adaptation futurs. Elle présente cependant des limites, dans les secteurs exposés aux vagues et pour des niveaux d'élévation du niveau de la mer importants.

Ces mesures d'adaptation se focalisent sur l'aménagement du territoire. Leur mise en place et leur efficacité nécessitent des mesures visant à réduire la vulnérabilité sociale et économique des personnes et des acteurs exposés, mais aussi l'instauration d'une gouvernance, de financements et d'outils d'accompagnement permettant d'appuyer l'adaptation. Ces conditions facilitantes ne sont pas spécifiques au domaine côtier et peuvent être mutualisées avec d'autres politiques publiques.

En France, un certain nombre de politiques publiques, de stratégies, de plans et d'initiatives locales, impliquant ou non les services de l'État, contribuent à faire émerger des stratégies d'adaptation. Les plans de prévention des risques, notamment, rendent inconstructibles certaines zones exposées aux submersions marines et prescrivent des interventions d'accommodation sur les bâtiments existants. Le Conservatoire du Littoral mène des démonstrations d'adaptation souple, mobilisant des solutions fondées sur la nature, en partenariat avec les collectivités et les autres acteurs du territoire.

En résumé, de nombreuses réponses d'adaptation existent, mais l'inévitabilité de plusieurs mètres d'élévation du niveau marin implique qu'à long terme, seules deux stratégies demeureront efficaces : la protection ou la relocalisation.

Quelle adaptation pour les littoraux ?

Les parties précédentes montrent que les effets du changement climatique sont à juste titre considérés comme un défi exigeant nécessitant d'effectuer des choix difficiles. À cela s'ajoute le constat que de nombreuses options d'adaptation demandent des décennies pour être mises en place, ce qui crée un risque d'être pris de vitesse par l'élévation du niveau de la mer. Des politiques climatiques réduisant de manière massive et immédiate les émissions de gaz à effet de serre, en contenant l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, peuvent réduire ce risque et donner du temps à l'adaptation.

La multiplicité de scénarios plausibles et très contrastés d'élévation du niveau de la mer implique également de considérer des mesures d'adaptation non plus optimales, mais robustes face à l'ensemble de ces

scénarios (Marchau *et al.*, 2019). Une question centrale est donc d'identifier des approches d'adaptation qui, au-delà de la seule réduction des risques côtiers, apportent des bénéfices multiples et les plus durables possibles.

Parmi ces approches, certaines consistent tout simplement à laisser les écosystèmes côtiers fonctionner. Lorsque les dynamiques physiques et écologiques sont préservées, ces écosystèmes deviennent eux-mêmes des régulateurs des aléas. Distribués le long de toutes les côtes du monde (voir la Figure 3), ils produisent des contributions essentielles pour la protection côtière : les récifs coralliens, les mangroves et herbiers marins contribuent à atténuer l'énergie des vagues, la végétation duniaire favorise l'accrétion en stabilisant le sable transporté par le vent, les marais côtiers et beaucoup d'autres écosystèmes peuvent constituer des zones tampon entre la mer et les infrastructures et s'ajuster progressivement à de nouveaux niveaux marins. Ces réponses d'adaptation sont regroupées sous la large dénomination de « solutions fondées sur la nature » car elles reposent sur des processus dynamiques capables d'évoluer avec les conditions environnementales.

Les écosystèmes côtiers et estuariens, comme tous les écosystèmes, sont menacés non seulement par le changement climatique, mais aussi par l'artificialisation des côtes, la pollution, la surexploitation, des espèces invasives. Ces pressions, en combinaison avec l'élévation du niveau de la mer, créent un phénomène de compression côtière, réduisant les espaces disponibles pour les sédiments et les écosystèmes. Néanmoins, même dans des contextes fortement dégradés, le maintien ou la reconquête de taux de biodiversité et de fonctionnalités écologiques restent porteurs de bénéfices,

à la fois pour la réduction des risques et pour d'autres activités humaines.

En 2022, le GIEC a fait le constat qu'une grande partie des écosystèmes côtiers et estuariens ne pourraient pas s'adapter de manière autonome et que leur adaptation nécessitera des interventions humaines (Cooley *et al.*, 2022). Dans ce domaine, la première des interventions d'adaptation consiste à réduire voire stopper les pressions exercées sur ces écosystèmes et à préserver ou restaurer des espaces nécessaires à leurs fonctionnement et à leur migration. En matière de compression côtière, par exemple, il existe une remarquable cohérence entre les mesures d'adaptation robustes à l'élévation du niveau de la mer, d'une part, et les priorités d'adaptation assistée en faveur des écosystèmes, d'autre part. Cette cohérence s'étend à d'autres aspects de la gestion des zones côtières, tels que la préservation des paysages littoraux pour les générations futures ou le développement du tourisme.

En résumé, s'il est bien pertinent de considérer l'élévation du niveau de la mer comme un risque, l'adaptation offre néanmoins une opportunité : en rendant indispensables des recompositions territoriales, elle offre la possibilité de créer des espaces pour les sédiments et les écosystèmes, contribuant ainsi à la fois à l'adaptation aux risques d'érosion et de submersion aggravés par l'élévation du niveau de la mer, mais aussi à l'adaptation assistée des écosystèmes côtiers et à l'atteinte des objectifs des politiques de biodiversité. Une telle approche ne peut pas être mise en œuvre partout, mais il est important de noter que même des projets de développement côtiers misant avant tout sur la protection côtière par ingénierie peuvent être conçus de manière à laisser des habitats pour la biodiversité (Cooley *et*

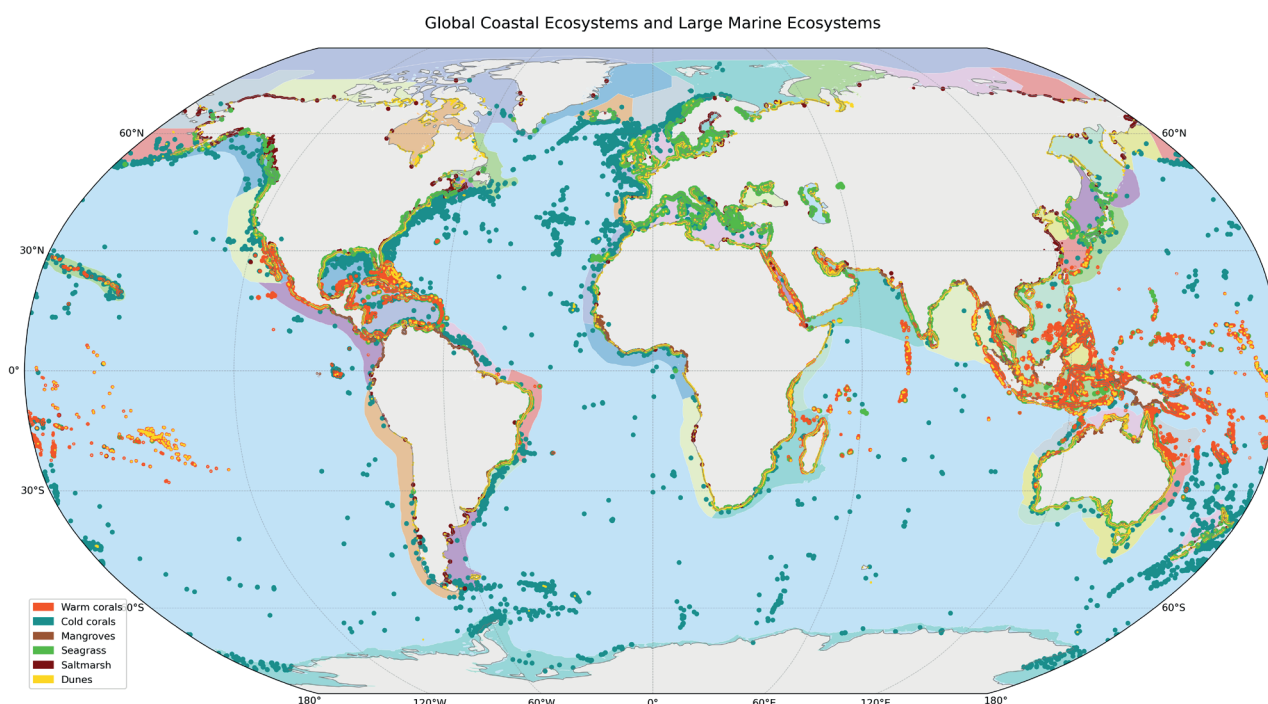


Figure 3 : Distribution géographique de grands types d'écosystèmes côtiers et marins (Données : <https://habitats.oceanplus.org/> et <https://doi.org/10.5281/zenodo.15607678>).

al., 2022). Dans ce domaine, il est essentiel non seulement de maintenir des objectifs ambitieux, tels que ceux posés par le règlement européen sur la restauration de la nature, mais aussi de se doter d'instruments efficaces pour atteindre ces objectifs.

Sans nier les difficultés de mise en œuvre, il est encourageant de voir que le développement de ces approches cherchant à maximiser les bénéfices environnementaux des interventions d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer progressent en France. Ceci est perceptible non seulement dans des documents de planification, tels que la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, dans la stratégie d'acteurs majeurs tels que le Conservatoire du littoral, mais aussi et surtout dans les initiatives locales de nombreuses collectivités qui comprennent que l'intérêt de leurs habitants à long terme est de préserver les littoraux tout en évitant de reporter les défis de l'adaptation sur les générations suivantes.

Références

- BROWN S., NICHOLLS R., HANSON S. *et al.* (2014), "Shifting perspectives on coastal impacts and adaptation", *Nature Climate Change*, 4, pp. 752-755.
- CAZENAVE A., YANG C., BOUIH M., STORTO A., CHEN J., LLOVEL W. *et al.* (2026), "Evidence of increased deep ocean warming from a sea level budget approach", *Earth's Future*, 14, e2025EF007403.
- COOLEY S., SCHOEMAN D., BOPP L., BOYD P., DONNER S., GHEBREHIWET D.Y. *et al.* (2022), "Oceans and coastal ecosystems and their services", in PÖRTNER H.-O., ROBERTS D.C., TIGNOR M. *et al.* (éds.), *Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 379-550.
- FOX-KEMPERB., HEWITTH.T., XIAOC., ADALGEIRSDÓTTIR G., DRIJFHOUT S.S., EDWARDS T.L. *et al.* (2021), "Ocean, Cryosphere and Sea Level Change", in MASSON-DELMOTTE V., ZHAI P., PIRANI A. *et al.* (éds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1211-1362.
- HAUT CONSEIL POUR LE CLIMAT (2026), *Les politiques climatiques dans les territoires – Mieux mobiliser le potentiel des collectivités*, avril, Paris.
- LE COZANNET G., THIÉBLEMONT R., ROHMER J. & CAPDERREY C. (2025), "Sea-level scenarios aligned with the 3rd adaptation plan in France", *Comptes Rendus. Géoscience*, 357, pp. 105-123.
- MARCHAU V.A.W.J., WALKER W.E., BLOEMEN P.J.T.M. & POPPER S.W. (éds.) (2019), *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice*, Springer International Publishing.
- PASQUIER U., NICHOLLS R.J., LE COZANNET G., SAYERS P., VÖLZ V., HINKEL J. *et al.* (2026), "Structural accommodation as a coastal adaptation response to sea-level rise: Lessons from Europe", *Earth's Future*, 14, e2025EF006797.
- VON HARDENBERG W.G. (2024), *Sea level: A history*, University of Chicago Press.
- VON SCHUCKMANN K., MOREIRA L., CANCEL M., GUES F., AUTRET E., BAKER J. *et al.* (2024), "The state of the global ocean", in VON SCHUCKMANN K., MOREIRA L., GRÉGOIRE M. *et al.* (éds.), *8th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR8)*, Copernicus Publications, State Planet, 4-osr8, 1.

La place de l'océan dans la transition énergétique

Par Marion CUIF

Ifremer Centre Atlantique

Longtemps oublié des politiques climatiques, l'océan est désormais au cœur des stratégies de neutralité carbone. L'émergence du « carbone bleu » comme axe stratégique de la Stratégie nationale bas-carbone impose ainsi une double mission de sanctuarisation et de restauration des écosystèmes côtiers. Parallèlement, la géo-ingénierie et le stockage géologique *offshore* ouvrent des perspectives de séquestration active, mais leurs incertitudes environnementales et sociétales, ainsi que leur bilan carbone global, appellent à la prudence. Les énergies marines renouvelables constituent un levier majeur de décarbonation avec l'éolien *offshore* comme figure de proue. Cependant, l'intégration de ces infrastructures soulève des défis écologiques et matériels majeurs. Entre solutions fondées sur la nature et déploiement d'infrastructures critiques, comment définir une trajectoire maritime qui concilie urgence climatique et préservation des écosystèmes marins ?

L'océan comme puits de carbone

Les pompes océaniques

L'océan joue un rôle central dans la régulation du climat mondial. Selon le rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère (IPCC, 2019), il a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂ au cours des dernières décennies, limitant ainsi l'ampleur du réchauffement global. D'après Friedlingstein *et al.* (2026), la capacité d'absorption de l'océan est supérieure de 15 % à celle des terres émergées. Cette capacité repose sur deux mécanismes complémentaires (Bopp *et al.*, 2019). La pompe physique s'appuie sur la solubilité naturelle du CO₂ dans l'eau, un processus optimisé par les basses températures des hautes latitudes. En devenant plus denses, ces eaux froides plongent vers les abysses, entraînant le carbone dissous vers un stockage de long terme dans les couches profondes. La pompe biologique repose sur la fixation du carbone par les organismes marins. Le phytoplancton, par la photosynthèse, ainsi que les organismes calcificateurs (mollusques, crustacés), transforment le CO₂ dissous en matière organique ou minérale. À leur mort, une partie de cette biomasse sédimente vers les fonds marins, assurant une séquestration durable.

Le « carbone bleu »

Au-delà de la haute mer, les écosystèmes côtiers (mangroves, herbiers marins et marais salants) longtemps occultés par les puits forestiers et agricoles dans les comptabilités nationales, sont aujourd'hui identifiés comme des réservoirs de carbone d'une densité exceptionnelle (McLeod *et al.*, 2011 ; IPCC, 2019). Leur préservation représente un enjeu double : maintenir leur capacité de stockage de carbone tout en protégeant la biodiversité littorale, imposant une double priorité

d'action. Premièrement, la sanctuarisation des stocks existants est essentielle pour prévenir tout déstockage massif de CO₂ en limitant l'artificialisation du littoral et en renforçant le réseau des aires marines protégées. En second lieu, la restauration active doit permettre de réhabiliter les zones humides dégradées pour accroître dynamiquement la séquestration de carbone.

La Stratégie nationale bas-carbone, cadre opérationnel de la trajectoire de neutralité carbone à l'horizon 2050 de la France, accorde désormais une attention croissante aux puits de carbone marins (ministère de la Transition écologique, 2025). Cette évolution marque une convergence entre la planification climatique et la stratégie nationale pour la biodiversité : la préservation de la capacité d'absorption de l'océan est désormais perçue comme une condition de l'équilibre de notre bilan carbone.

Capture et stockage du CO₂ par géo-ingénierie

L'urgence climatique conduit à l'exploration de solutions de séquestration active. Dans cette perspective, les recherches et projets industriels sur les techniques de captage du CO₂ dans le milieu marin (marine Carbon Dioxide Removal, mCDR) ou de stockage géologique après capture dans un objectif de réutilisation (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) connaissent un développement significatif, soutenu par les instances internationales et les acteurs majeurs du secteur énergétique.

Plusieurs technologies de géo-ingénierie marine existent pour capter le CO₂ atmosphérique (mCDR) : la culture de la biomasse au travers de la fertilisation de l'océan, l'éclaircissement des nuages marins, l'amélioration de la surface de l'albédo, l'amélioration de

L'océan au cœur de la transition énergétique

l'alcalinité des océans. Ces différentes technologies, dont l'efficacité est encore mal connue et qui peuvent engendrer des perturbations durables du milieu marin, nécessitent la production de connaissances scientifiques avant d'envisager leur déploiement à grande échelle (Oschlies *et al.*, 2023). En outre, le potentiel de séquestration de ces technologies reste très anecdotique au regard des 40 gigatonnes de CO₂ émis chaque année par l'humanité. Pour ces raisons elles ne sauraient être présentées comme une solution à court terme (Bellanger, 2026).

Le stockage géologique *offshore* du CO₂ (CCUS) consiste en l'injection de CO₂ extrait de procédés industriels dans une formation géologique poreuse (aquifères salins profonds, gisements d'hydrocarbures épuisés, veines de charbon inexploitable et schistes riches en matières organiques), par le biais d'un forage profond, où il restera capturé pour une période estimée entre 100 et 1 000 ans. Plusieurs dangers sont associés au stockage géologique du CO₂. Parmi eux figurent l'activation de failles, les micro-séismes ou encore la défaillance de la roche de couverture (Vilarrasa *et al.*, 2019). La pertinence de la filière reste conditionnée par son bilan carbone global et la maîtrise de son impact environnemental et sociétal.

En tout état de cause, les techniques mCDR et CCUS ne sauraient se substituer aux efforts de réduction drastique des émissions à la source.

L'océan comme source d'énergie : les énergies marines renouvelables

Dans le sillage des recommandations du GIEC, les énergies marines renouvelables (EMR) s'imposent comme une solution de long terme pour le climat, fondée sur la valorisation de l'espace océanique. Au-delà de leur contribution à la neutralité carbone, ces technologies constituent un levier d'indépendance énergétique. Elles participent à la solidité du système électrique en offrant une production décarbonée, prévisible et massive.

État de l'art et trajectoires de maturité des filières

Le paysage technologique des EMR présente des degrés de maturité contrastés, nécessitant des approches d'accompagnement différenciées :

- L'éolien *offshore* (posé et flottant) : la technologie posée a atteint un stade de maturité commerciale avancée, bénéficiant d'une baisse drastique de son LCOE¹ ces dernières années. L'éolien flottant, pivot de l'expansion vers les zones de grande profondeur, entre dans une phase d'industrialisation visant à capter des gisements plus lointains et plus réguliers.

¹ Levelized Cost Of Energy : le coût actualisé de l'énergie correspond, pour une installation de production d'énergie donnée, à la somme des coûts actualisés de production d'énergie divisée par la quantité d'énergie produite, elle aussi actualisée ; le taux d'actualisation est déterminant.

- Les technologies émergentes : l'énergie hydrolienne, exploitant les courants marins, figure parmi les solutions les plus matures après l'éolien. Parallèlement, l'énergie houlomotrice, l'énergie thermique des mers et l'énergie osmotique particulièrement pertinentes pour la résilience énergétique des territoires insulaires et ultramarins font l'objet de recherches ciblées.

L'effort de recherche et d'innovation s'articule aujourd'hui autour de la levée de verrous technologiques transversaux (câblage dynamique, tenue des matériaux en milieu hostile, systèmes d'ancrage). Un enjeu majeur réside dans l'intégration de ces infrastructures industrielles au sein de socio-écosystèmes complexes, imposant une connaissance fine de leurs impacts environnementaux.

Vers un changement d'échelle : objectifs européens et déclinaisons nationales

Sous l'impulsion du Pacte vert, l'Union européenne ambitionne une mutation profonde de son infrastructure énergétique, visant 300 GW d'éolien en mer et 40 GW pour les autres EMR d'ici 2050. Ce passage d'une logique de démonstrateurs à une exploitation industrielle d'envergure suppose une structuration robuste des chaînes de valeur européennes. La France, détentrice du deuxième gisement éolien marin d'Europe, a révisé ses ambitions à la hausse *via* la Stratégie Nationale pour la Mer et le Littoral (SNML 2024-2030) et la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE 2026-2035). L'objectif est de positionner l'éolien en mer comme la deuxième source de production électrique nationale après le nucléaire, avec une cible de 45 GW en 2050 (soit environ 50 parcs) dont 3,6 GW en 2030 et 15 GW en 2035². Cette programmation s'accompagne d'un soutien réaffirmé aux filières hydroliennes et aux expérimentations en zones tropicales, confirmant la volonté de l'État de maintenir une expertise multi-filières au service de la transition écologique. Les enjeux de coûts de production compétitifs seront également déterminants.

Le transport maritime : enjeu de décarbonation de la flotte mondiale

Au-delà de ses fonctions de captage de carbone ou de gisement énergétique, l'océan demeure le vecteur principal des échanges mondiaux, dont la transition écologique constitue un défi industriel majeur. Bien que le transport maritime ne représente qu'environ 3 % des émissions mondiales de CO₂, son poids au sein de la chaîne de valeur globale impose une mutation profonde des modes de propulsion et des infrastructures portuaires. L'Organisation Maritime Internationale a ainsi défini une trajectoire ambitieuse visant la neutralité carbone à l'horizon 2050, jalonnée par des paliers de réduction intermédiaires dès 2030 et 2040. Cette

² <https://www.economie.gouv.fr/files/files/2026/ppe3.pdf?v=1772447721>

transition repose sur trois piliers technologiques et opérationnels :

- La diversification des vecteurs énergétiques : l'émergence de carburants alternatifs bas carbone est au cœur de la stratégie de la filière. Le méthanol de synthèse, l'ammoniac vert et l'hydrogène liquide apparaissent comme les solutions les plus prometteuses pour remplacer les combustibles fossiles, malgré des défis persistants en matière de densité énergétique et de sécurité de stockage.
- Le renouveau de la propulsion vélique : le recours au vent, *via* des dispositifs d'assistance à la propulsion (voiles rigides, rotors, cerfs-volants), connaît un regain d'intérêt industriel. Cette solution hybride permet d'envisager des économies de combustible de l'ordre de 10 à 20 %, réduisant d'autant l'empreinte environnementale des navires existants.
- L'électrification et l'excellence environnementale des terminaux : la transformation vers des « ports zéro émission » implique une électrification massive des quais (branchement à quai ou *cold ironing*) afin de supprimer les émissions polluantes lors des phases d'escale, tout en intégrant ces *hubs* logistiques dans les réseaux énergétiques locaux (*smart grids*).

L'intégration des EMR : entre défis écologiques et compromis socio-économiques

L'empreinte environnementale de l'éolien en mer

L'intégration de l'éolien *offshore* dans le milieu marin impose une conciliation étroite entre développement industriel et préservation de l'environnement. Cette problématique s'articule autour de deux piliers d'évaluation distincts : les impacts environnementaux *in situ* et l'empreinte écologique globale de la filière.

L'Expertise scientifique collective (ESCo) menée par l'Ifremer et le CNRS sur les effets des éoliennes en mer et de leur raccordement sur la biodiversité met en exergue des interactions complexes avec la biodiversité marine. Les risques de collision pour l'avifaune et les nuisances acoustiques lors des phases de chantier sur les mammifères marins sont bien documentés, ainsi que l'apparition d'un « effet récif » *via* les structures immergées modifiant localement les biocénoses en favorisant les espèces de substrat dur. Des incertitudes subsistent quant aux effets cumulés à l'échelle des populations marines et aux impacts sur les bas niveaux trophiques, rendant nécessaire l'approfondissement des connaissances scientifiques pour définir des mesures d'atténuation efficaces.

Au-delà des impacts *in situ*, l'empreinte environnementale de la filière doit être appréhendée sous l'angle de son cycle de vie complet. La fabrication des infrastructures mobilise des volumes massifs d'acier et de béton pour les fondations ou les ancrages, ce qui en fait le premier poste d'émissions de CO₂. L'éolien en mer est une technologie de production électrique intense en

métaux stratégiques (cuivre pour le câblage et terres rares comme le néodyme pour les aimants permanents des turbines) (IEA, 2024). L'installation des parcs mobilise une flotte de navires de levage et de câblage fortement consommatrice de combustibles fossiles, tandis que la corrosion accélérée en milieu salin impose un régime de maintenance exigeant. Le démantèlement des parcs (après 25-30 ans) soulève des défis encore partiellement explorés, notamment la recyclabilité des pales en matériaux composites. Le recyclage du cuivre et des terres rares pourrait devenir une mine urbaine secondaire pour réduire la pression sur les ressources vierges³. Le démantèlement des parcs pose également un dilemme écologique inédit : la suppression des fondations pourrait entraîner la destruction des nouveaux écosystèmes stabilisés par l'effet récif, interrogeant ainsi la définition même du retour à l'état initial.

Le défi de la Planification Spatiale Maritime

La complexité de ces impacts impose de dépasser une gestion par projets isolés au profit d'une planification spatiale maritime (PSM) intégrée (directive 2014/89/UE, 2014). Véritable outil de régulation publique, la PSM vise à concilier développement économique et protection des milieux marins en intégrant enjeux environnementaux, sociaux et économiques.

Cette démarche de planification repose sur une approche écosystémique qui ne se limite plus à une simple zonation géographique. Elle constitue un levier stratégique pour optimiser l'allocation des ressources spatiales : en identifiant des zones à moindre impact environnemental et à fort potentiel énergétique, en offrant aux opérateurs une visibilité de long terme, indispensable pour mobiliser les investissements massifs requis par la transition énergétique et en orchestrant la concertation entre les parties prenantes, afin de transformer la concurrence pour l'espace en une dynamique de coactivité. L'enjeu pour l'État, au travers des documents stratégiques de façade (DSF), est d'assurer une gouvernance de la mer capable d'arbitrer entre les échelles temporelles : l'urgence climatique, qui appelle une accélération du déploiement des EMR, et le temps long de la régénération des écosystèmes marins.

Conclusion

Si l'océan offre des leviers de décarbonation sans équivalent, il abrite des écosystèmes sensibles situés en première ligne face aux ruptures d'équilibre de la planète. Parmi ces leviers, les énergies marines renouvelables occupent une place centrale dans la transition énergétique. Dès lors, le succès de cette transition implique un effort soutenu de recherche pour éclairer la décision publique et les choix industriels selon trois axes directeurs : l'approfondissement de la connaissance du fonctionnement des écosystèmes marins et

³ Pour les dépendances aux matériaux et leur recyclage voir notamment le numéro de *Réalités industrielles* intitulé « Les métaux stratégiques, nouveau défi de la transition énergétique et de la réindustrialisation », <https://annales-des-mines.org/2025-11-sommaire-ri-les-metaux-strategiques-nouveau-defi-de-la-transition-energetique-et-de-la-reindustrialisation/>

de leurs interactions avec ces infrastructures industrielles pour garantir une protection effective, l'analyse rigoureuse des cycles de vie de ces installations et le développement de mesures d'atténuation limitant l'empreinte environnementale des énergies marines renouvelables. Plus que tout, la responsabilité des décideurs réside dans l'adoption d'une planification de la sobriété. Les solutions fondées sur l'océan ne seront durables que si elles s'accompagnent d'une réduction drastique de la pression anthropique globale, passant par la modération des usages et la priorité absolue donnée à la résilience des écosystèmes marins.

VILARRASA V., CARRERA J., OLIVELLA S., RUTQVIST J. & LALOU L. (2019), "Induced seismicity in geologic carbon storage", *Solid Earth*, 10(3), pp. 871-892, <https://doi.org/10.5194/se-10-871-2019>

Bibliographie

BELLANGER M. (2026), « Géo-ingénierie marine : qui développe ces grands projets, et qu'y a-t-il à y gagner ? », *The conversation*, <https://doi.org/10.64628/AAK.ex9mfrchh>

BOPP L., BOWLER C., GUIDI L., KARSENTI E. & DE VARGAS C. (2019), « L'océan, pompe à carbone », 6 pages, *Plateforme Ocean Climat*, <https://ocean-climate.org/presentation-des-fiches-scientifiques-ocean-et-climat/locean-pompe-a-carbone/>

FRIEDLINGSTEIN P., LE QUÉRÉ C., O'SULLIVAN M. *et al.* (2026), "Emerging climate impact on carbon sinks in a consolidated carbon budget", *Nature*, 649(8092), pp. 98-103, <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09802-5>

IEA (2024), "Global Critical Minerals Outlook 2024", International Energy Agency, <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>

IPCC (2019), "IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate" [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pages, <https://doi.org/10.1017/9781009157964>

MCLEOD E. *et al.* (2011), "A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂", *Frontiers in Ecology and the Environment*, pp. 552-560, <https://doi.org/10.1890/110004>

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (2025), « Projet de Stratégie nationale bas carbone révisée n°3 », https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/2025-%20Projet%20SNBC%203%20compress-Partie%201_Vfin_vdef_clean_clean%20COMPRESS.pdf

MINISTÈRE DE LA MER (2024), « Stratégie Nationale pour la Mer et le Littoral (SNML 2024-2030) », 48 pages, https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2024-06/strategie_nationale_mer_littoral_20242030.pdf

OSCHLIES A., STEVENSON A., BACH L. T., FENNEL K., RICKABY R. E. M., SATTERFIELD T., WEBB R. & GATTUSO J.-P. (2023), "Guide to best practices in ocean alkalinity enhancement research (OAE Guide 23)", Copernicus Publications, State Planet, 2-oae2023, <https://doi.org/10.5194/sp-2-oae2023>

PROGRAMMATION PLURIANNUELLE DE L'ÉNERGIE (PPE 2026-2035), « Décret n° 2026-76 du 12 février 2026 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie », JORF n°0037 du 13 février 2026, <https://www.economie.gouv.fr/files/files/2026/ppe3.pdf?v=1771405459>

UNION EUROPÉENNE (2014), « Directive 2014/89/UE du Parlement européen et du Conseil du 23 juillet 2014 établissant un cadre pour la planification de l'espace maritime », *Journal officiel de l'Union européenne*, L257, 28 août 2014, pp. 135-145.

L'Observatoire national de l'éolien en mer : renforcer la connaissance de la biodiversité pour éclairer la transition énergétique

Par Marion CUIF

Ifremer centre Atlantique

Olivier LE PIVERT

Ifremer centre Bretagne

& Maëlle NEXER

Office français de la biodiversité (OFB)

Créé en 2022 par les pouvoirs publics, l'Observatoire national de l'éolien en mer (ONEM) vise à éclairer le débat public sur les impacts environnementaux des parcs éoliens *offshore*. Si l'éolien en mer est crucial pour décarboner le mix énergétique français, son développement doit concilier transition énergétique et préservation de la biodiversité marine. Selon l'IPBES, les infrastructures *offshore* constituent en effet un « changement d'usage », représentant la deuxième pression majeure sur la biodiversité marine.

Doté initialement de 50 millions d'euros, l'ONEM a structuré un programme stratégique pour combler les lacunes scientifiques et diffuser les connaissances auprès des acteurs concernés. Alors que son enveloppe budgétaire arrive à échéance, la pérennité de l'Observatoire est aujourd'hui questionnée. Les auteurs plaident activement pour la poursuite de cette initiative et demandent une stratégie de recherche pérenne afin d'appuyer efficacement la décision publique.

Genèse et fondements de l'Observatoire national de l'éolien en mer

En 2020, aucun parc éolien en mer n'est encore en service en France mais une accélération industrielle majeure est lancée. Un total de 3,5 GW de projets de parcs éoliens en mer commerciaux est déjà attribué, quatre fermes flottantes pilotes sont en projet et une dizaine d'autres projets de parcs sont prévus pour atteindre les 5 GW cibles de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2028. Cette montée en puissance rapide a suscité de vives questions sociétales autour des effets des parcs éoliens en mer sur l'environnement. Portée par une pluralité d'acteurs locaux et institutionnels, cette exigence de connaissances scientifiques sur les impacts potentiels des parcs éoliens sur l'environnement marin s'est ainsi largement exprimée lors des débats publics organisés pour l'attribution de nouvelles zones de parcs éoliens. Dans le bilan du débat public relatif au parc normand Centre Manche par exemple, la Commission Nationale du Débat Public (CNDP) souligne en octobre 2020 la

persistance d'interrogations sans réponse, agissant comme de puissants vecteurs de controverse dans un contexte de défiance envers la parole institutionnelle. Ce déficit de légitimité est exacerbé par une dispersion de l'effort de recherche et des connaissances scientifiques sur le sujet. En somme, le défaut de centralisation des savoirs et le manque de visibilité sur les chantiers de recherche restant à mener ont agi comme des obstacles majeurs à l'acceptabilité sociale des projets.

C'est dans ce contexte que le Premier ministre Jean Castex a annoncé, lors de la déclaration sur la croissance verte à Saint-Nazaire en août 2021, la mise en place d'un Observatoire national de l'éolien en mer (ONEM)¹. Dédié à l'étude des impacts des parcs éoliens *offshore* sur la biodiversité marine et doté d'une enveloppe de 50 millions d'euros, cet outil vise à pallier le déficit de connaissances scientifiques sur le sujet.

¹ <https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire>

Un pilotage interministériel adossé à l'expertise d'établissements publics de référence

L'ONEM se situe à l'intersection de deux impératifs cardinaux : d'une part, l'accélération de la transition énergétique, qui voit dans l'éolien en mer un levier majeur de décarbonation du mix électrique (IPCC, 2019, 2022) ; d'autre part, la préservation des écosystèmes marins (IPBES, 2019), qui exige que l'exploitation de l'espace maritime soit compatible avec la conservation de la biodiversité et la résilience des écosystèmes. Conçu comme un instrument d'accompagnement de l'action publique face à ces mutations, l'ONEM doit apporter un éclairage scientifique indispensable à la convergence de trois politiques cadres de l'Union européenne. Il s'inscrit d'abord dans la Stratégie pour les énergies renouvelables en mer, qui ambitionne un déploiement massif de 340 GW à l'horizon 2050 au sein des États membres. Cette dynamique est toutefois subordonnée au respect de la directive-cadre « Stratégie pour le milieu marin » (DCSMM²), garante du bon état écologique des eaux marines, ainsi qu'à la directive sur la Planification de l'espace maritime³, laquelle promeut une gestion intégrée basée sur une approche écosystémique, afin de préserver dans la durée les conditions environnementales de leur développement.

La mise en œuvre de ces politiques transversales mobilise respectivement la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), la direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN) et la direction générale des Affaires maritimes, de la Pêche et de l'Aquaculture (DGAMPA). Cette architecture interministérielle, qui préside au pilotage de l'ONEM, garantit l'adéquation des travaux de l'ONEM avec les enjeux politiques dont sont porteuses ces directions : décarbonation du mix énergétique, protection de la biodiversité et conciliation des activités maritimes.

Afin d'assurer le déploiement opérationnel de l'ONEM, les directions de tutelle ont choisi de s'adosser à deux établissements publics de référence : l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer) et l'Office français de la biodiversité (OFB). Ce choix est dicté par la complémentarité de leurs expertises et leur légitimité historique dans l'appui aux politiques maritimes. Leur indépendance et leur capacité éprouvée à piloter des programmes complexes d'acquisition de données et de recherche garantissent ainsi la rigueur scientifique et technique nécessaire à la réussite de cette nouvelle instance.

Unique organisme de recherche national intégralement dédié à la recherche sur l'océan, l'Ifremer déploie une expertise axée sur la préservation des milieux et l'exploitation raisonnée des ressources. Signe de cet engagement, l'institut a érigé les énergies marines renouvelables en priorité stratégique, formalisée par une feuille de route dédiée en 2024. La stratégie de l'institut repose sur une compréhension fine des interactions

entre les énergies marines renouvelables et les écosystèmes ainsi que sur le développement de leviers de minimisation des impacts.

L'OFB est un établissement public qui a, entre autres⁴, pour mission d'approfondir la connaissance du vivant et de développer une expertise scientifique au service des politiques publiques. Dans ce cadre, l'OFB s'engage activement dans l'accompagnement du déploiement des énergies renouvelables sur le territoire, afin d'en limiter les impacts environnementaux. À ce titre, l'OFB contribue conjointement aux deux Observatoires : l'Observatoire des Énergies renouvelables et de la Biodiversité, dédié aux énergies terrestres, codéveloppé avec l'Ademe, et l'ONEM, en partenariat avec l'Ifremer.

Sous l'égide des trois directions pilotes et avec l'appui scientifique et technique de l'Ifremer et de l'OFB, l'ONEM articule son action autour de trois missions. Sa première mission consiste en la capitalisation et la diffusion du corpus de connaissances existantes. Sa deuxième mission porte sur l'acquisition de données complémentaires relatives au milieu marin et aux interactions entre parcs éoliens *offshore* et biodiversité. Enfin, l'ONEM a pour vocation de normaliser les protocoles d'évaluation, en contribuant à définir une méthodologie nationale scientifique pour le suivi des impacts environnementaux des parcs.

Une gouvernance fondée sur l'expertise scientifique et l'ouverture aux parties prenantes

La gouvernance de l'ONEM repose sur un triptyque d'instances complémentaires, dont l'installation effective dès 2022 témoigne de l'urgence et de l'importance accordée à la structuration du dialogue scientifique et institutionnel.

L'instance décisionnelle de l'ONEM, le Comité stratégique (COSTRAT), assure la coordination des travaux de l'ONEM et arrête la programmation financière allouée aux projets. Ce comité se tient sous la présidence conjointe des trois directions d'administration centrale précitées et avec l'appui de l'OFB et de l'Ifremer. Afin d'ancrer ses décisions dans les réalités territoriales, sa composition intègre une représentation alternée des échelons déconcentrés, impliquant tour à tour les directions interrégionales de la Mer (façades Nord Atlantique Manche Ouest ou Manche Est Mer du Nord) et les directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Occitanie ou PACA).

Le Conseil scientifique national est le garant de la rigueur scientifique des travaux. Il formule ses avis en toute indépendance. Ce collège, constitué de dix-neuf experts reconnus pour leurs compétences thématiques ou transversales, oriente les priorités de recherche et

² <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj?locale=fr>

³ <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/89/oj?locale=fr>

⁴ Les cinq missions de l'OFB sont : police de l'environnement, connaissance et expertise, mobilisation de la société, appui aux politiques publiques, gérer et aider à la gestion des espaces protégés, prérogatives en matière de chasse, <https://ofb.gouv.fr/missions>

évalue la pertinence des programmes d'acquisition de connaissances. Sous l'impulsion de sa présidence assurée par Clara Ulrich, chercheuse à l'Ifremer, après avoir été occupée par Françoise Gaill jusqu'en 2025, cette instance oriente les choix techniques et la sélection des projets au regard de l'état de l'art scientifique.

L'Assemblée des parties prenantes est l'organe de consultation pluraliste de l'ONEM, regroupant l'ensemble des usagers de la mer et de la société civile. En se réunissant une à deux fois par an, cette assemblée constitue un espace de dialogue stratégique visant à informer les acteurs des progrès scientifiques tout en intégrant leurs propositions. Elle concourt ainsi à l'adéquation entre les travaux de recherche et les attentes sociétales, favorisant une appropriation collective des enjeux de l'éolien en mer.

Capitalisation des connaissances et acquisitions *in situ* (2022-2025)

Le premier volet de l'ONEM a consisté en la réalisation d'un retour d'expérience international⁵, doublé d'une analyse critique de la littérature scientifique mondiale portée par l'Ifremer et le CNRS au travers de l'Expertise Scientifique Collective sur les effets des parcs éoliens en mer et de leur raccordement sur la biodiversité (ESCo). Ces travaux ont révélé la persistance notable de zones d'ombre, en dépit d'une exploitation industrielle déjà mature en Europe du Nord. Cette situation s'explique par l'absence d'harmonisation des suivis environnementaux réalisés à l'étranger, dont les résultats, restreints à l'échelle de parcs individuels, s'avèrent difficilement comparables. Elle est également tributaire de la relative jeunesse des programmes de recherche dans le domaine, confrontés à une méconnaissance systémique du milieu marin.

Le deuxième volet de l'ONEM répond à un déficit de connaissances significatif sur les milieux marins et sur leurs interactions avec l'éolien en mer. Adoptant une démarche pragmatique, l'ONEM a impulsé des acquisitions de données *in situ* sans attendre l'achèvement des états de l'art, ciblant prioritairement les compartiments biologiques dont la sensibilité aux infrastructures *offshore* était connue (avifaune, mammifères marins et ichtyofaune) ainsi que la caractérisation de leurs zones fonctionnelles. En complément, un appel à projets lancé en 2023 visait à stimuler la recherche sur les interactions entre éoliennes en mer et biodiversité.

L'ensemble de ces travaux d'acquisition de connaissances devrait, d'ici 2029, aboutir à plus d'une centaine de campagnes d'acquisition, 200 livrables et plusieurs centaines de téraoctets de données, autant de ressources destinées à alimenter les mesures d'évitement, de réduction et de compensation applicables aux projets en développement comme en exploitation, et qui seront toutes rendues publiques⁶.

Depuis sa création, l'ONEM a financé 33 projets mobilisant 47 acteurs, répartis en trois axes : 23 projets d'acquisition de connaissances sur le milieu marin, 9 projets portant sur les interactions entre ce dernier et les parcs éoliens, et un projet transversal de valorisation des données produites par l'ensemble du programme. Couvrant l'ensemble des façades maritimes métropolitaines, ces travaux embrassent une large diversité de compartiments biologiques : avifaune, mammifères marins, poissons, élastomobranches, tortues, crustacés, mollusques et habitats benthiques.

L'avifaune et les mammifères marins sont les groupes les plus représentés dans le portefeuille de projets. Le projet MIGRATLANE⁷ en est l'illustration la plus emblématique : avec 10,8 millions d'euros, il s'agit du projet doté du budget le plus important. Il vise à mieux comprendre la répartition spatio-temporelle de l'avifaune sur l'arc Manche-Atlantique et les interactions entre les parcs éoliens en mer et les oiseaux marins, les migrants terrestres et les chauves-souris.

Les interactions entre les parcs éoliens et le milieu marin à l'échelle des populations marines et des écosystèmes restent encore peu étudiées. Le projet GreyCo⁸ s'attache à comprendre les effets des parcs sur la connectivité des populations d'espèces benthiques, et les conséquences possibles sur la dispersion d'espèces non indigènes. Le projet EMOI⁹ pose les bases d'une compréhension des interactions à l'échelle écosystémique en développant des méthodes pour observer les effets des parcs sur les milieux physiques, chimiques et biologiques.

Le troisième volet de l'ONEM, relatif aux travaux méthodologiques visant à harmoniser les suivis des parcs éoliens *offshore* et à rendre les données qui en sont issues compatibles avec les principes FAIR (données accessibles, comprises, échangeables et réutilisables) a démarré en 2024 (standardisation des protocoles de suivi environnemental règlementaire et projet DATAEMR porté par l'Ifremer). Cette standardisation constitue le préalable indispensable à un changement de paradigme : s'extraire de l'analyse ponctuelle de parcs isolés pour conduire des évaluations à l'échelle écosystémique, seule maille pertinente pour appréhender les effets cumulés des parcs éoliens en mer avec les activités existantes.

Pérennisation de l'ONEM : transformer l'investissement initial en connaissance durable

L'accélération du déploiement de l'éolien *offshore*, avec pour objectif d'atteindre une puissance installée de 45 GW en 2050 (soit une cinquantaine de parcs) comme annoncé par le Président de la République en 2022, redéfinit l'échelle de la transition énergétique française. En inscrivant ces cibles massives dans la Stratégie

⁵ <https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire/projet-retex>

⁶ <https://data-onem.milieuamarinfrance.fr/>

⁷ <https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire/migratlane>

⁸ <https://www.eoliennesenmer.fr/connectivite-en-eaux-anthropisees-grey-connectivity>

⁹ <https://www.eoliennesenmer.fr/emoi>

nationale mer et littoral 2024-2030 ainsi que dans la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2026-2035, l'État confirme la place centrale de l'éolien en mer dans le mix décarboné. Dans ce contexte d'intensification industrielle, l'ONEM a constitué la principale réponse institutionnelle pour assurer un développement intégrant au mieux les enjeux écologiques, en fournissant le socle de connaissances scientifiques nécessaires à la décision publique. Mais la trajectoire esquissée en 2021 et 2022, avec la mise en place de l'ONEM et la création de fonds dédiés à la biodiversité abondés par les industriels lauréats des appels d'offres, se trouve remise en cause par l'épuisement des crédits alloués en 2021 à l'ONEM et l'absence d'enveloppe dédiée aux fonds biodiversité dans le prochain appel d'offres (AO10).

Après une phase d'amorçage de quatre années ayant suscité une mobilisation scientifique sans précédent, l'ONEM se trouve ainsi à un point d'inflexion. Les résultats de l'ESCo offrent désormais l'opportunité de structurer une trajectoire de recherche priorisée à l'horizon 2035. L'un des principaux défis est de dépasser l'observation statique pour accéder à une compréhension prospective des interactions entre parcs éoliens en mer et biodiversité dans un contexte de pressions multiples générées par les usages maritimes et le changement global. En projetant les évolutions futures et les réponses écologiques associées, l'ONEM pourra doter les décideurs d'outils d'arbitrage pour identifier les scénarios de déploiement optimisant la synergie entre impératifs de décarbonation et préservation de la biodiversité. Fort des bases solides établies lors de la phase initiale, il est aujourd'hui essentiel de pérenniser l'élan insufflé par l'ONEM. Poursuivre cet engagement permet de valoriser pleinement l'investissement public déjà réalisé et de garantir une planification de l'éolien en mer éclairée par la connaissance scientifique.

Bibliographie

CASTEX JEAN (2021), « Déclaration de M. Jean Castex, Premier ministre, sur la mise en œuvre de la "croissance verte" à base d'énergie décarbonée », Saint-Nazaire le 28 août 2021, <https://www.vie-publique.fr/discours/281446-jean-castex-28082021-croissance-verte-energie-decarbonee>

COMMISSION EUROPEENNE (2020), « Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des Régions. Une stratégie de l'UE pour exploiter le potentiel des énergies renouvelables en mer en vue d'un avenir neutre pour le climat », COM/2020/741 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN>

COMMISSION NATIONALE DU DEBAT PUBLIC (2020), « Bilan de la présidente de la commission nationale du débat public. Débat public : en mer, en Normandie, de nouvelles éoliennes », 4 pages, <https://eolmernormandie.debatpublic.fr/images/documents/EolMerNormandie-bilan.pdf>

GOVERNEMENT FRANÇAIS (2019), « Programmation pluriannuelle de l'énergie (2019-2023 2024-2028). Stratégie française pour l'énergie et le climat », 400 pages, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>

GOVERNEMENT FRANÇAIS (2024), « Stratégie Nationale Mer Littoral 2024-2030 », 48 pages, https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2024-06/strategie_nationale_mer_littoral_20242030.pdf

GOVERNEMENT FRANÇAIS (2026), « Programmation pluriannuelle de l'énergie (2026-2035). Stratégie française pour l'énergie et le climat », 232 pages, <https://www.economie.gouv.fr/files/files/2026/ppe3.pdf?v=1772447721>

IPBES (2019), "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services", E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors), IPBES secretariat, Bonn, Germany, 1 148 pages, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

IPCC (2019), "IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate" [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pages, <https://doi.org/10.1017/9781009157964>

IPCC (2022), "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3 056 pages, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

MACRON EMMANUEL (2022), « Déclaration d'Emmanuel Macron, président de la République, sur la politique de l'énergie, à Belfort le 10 février 2022 », <https://www.vie-publique.fr/discours/283773-emmanuel-macron-10022022-politique-de-lenergie>

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE (2026), « Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 2024-2028. Stratégie française pour l'énergie et le climat », 400 pages, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf>

PARLEMENT EUROPEEN & CONSEIL (2008), « Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre stratégie pour le milieu marin) », Directive 2008/56/CE, JO L164 du 25.6.2008, pp. 19-40, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj?locale=fr>

PARLEMENT EUROPEEN & CONSEIL (2014), « Directive 2014/89/UE du Parlement européen et du Conseil du 23 juillet 2014 établissant un cadre pour la planification de l'espace maritime », Directive 2014/89/UE, JO L257 du 28 août 2014, pp. 135-145, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/89/oj?locale=fr>

L'expertise scientifique collective (ESCo) sur les effets de l'éolien en mer sur la biodiversité

Eugénie CAZAUX^a (coord.), Cédric BACHER^a (coord.),
Nathalie NIQUIL^b (coord.), Marion CUIF^a,
Valérie LALLEMAND-BREINTENBACH^b & Olivier LE PIVERT^a

^a Ifremer

^b CNRS

L'Expertise scientifique collective (ESCo) « Éoliennes en mer & biodiversité », conduite conjointement par l'Ifremer et le CNRS, propose un état des connaissances scientifiques sur les effets des parcs éoliens en mer et de leurs raccordements sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. Fondée sur une revue systématique de la littérature scientifique internationale, elle s'appuie sur plus de 4 500 publications identifiées, dont 411 articles retenus pour une analyse détaillée. Elle constitue ainsi l'état de l'art le plus complet disponible sur le sujet. L'analyse porte sur les effets associés aux différentes pressions générées par les parcs éoliens, ainsi que sur les principales incertitudes, les lacunes de connaissances et les mesures d'atténuation documentées dans la littérature scientifique. Elle met en évidence des effets variables selon les contextes écologiques, les groupes biologiques et les technologies considérées, tout en soulignant les enjeux liés aux effets cumulés, aux suivis de long terme et à la transposabilité des résultats.

Cet article s'appuie sur les travaux conduits collectivement dans le cadre de l'Expertise scientifique collective (ESCo) « Éoliennes en mer & biodiversité »¹. Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des expertes et des experts mobilisés pour leur contribution aux travaux ayant permis la réalisation de cette synthèse.

Le changement climatique et la nécessité de réduire la dépendance aux énergies fossiles ont conduit à reconnaître l'urgence d'une décarbonation profonde des systèmes énergétiques (IPCC, 2019 ; 2022). Cette dynamique se traduit par le développement rapide des énergies renouvelables, parmi lesquelles l'éolien en mer occupe une place centrale. Son déploiement s'inscrit toutefois dans des écosystèmes marins déjà soumis à de multiples pressions, dans un contexte plus large d'érosion de la biodiversité (IPBES, 2019). La conjonction de ces deux impératifs sociétaux soulève la question des effets potentiels du développement de l'éolien en mer sur la biodiversité marine et le fonctionnement des écosystèmes. C'est à cette question que l'Expertise scientifique collective (ESCo) « Éoliennes en mer & biodiversité », conduite conjointement par l'Ifremer et le CNRS, apporte un éclairage scientifique.

Contexte et cadre d'analyse

L'ESCo répond à une saisine des ministères en charge de l'Énergie, de l'Écologie et de la Mer, dans le cadre de l'Observatoire national de l'éolien en mer (ONEM). Le contexte ayant conduit à l'émergence de cet observatoire, dont la création a été annoncée par le Premier ministre Jean Castex lors d'un déplacement à Saint-Nazaire en août 2021, est détaillé dans l'article précédent de cette revue intitulé « L'Observatoire national de l'éolien en mer ».

Rappelons simplement ici que le besoin d'une expertise scientifique a émergé à l'issue des débats publics relatifs à l'attribution de nouvelles zones de parcs, la Commission nationale du débat public (CNDP) ayant souligné l'existence de nombreuses interrogations restées sans réponse. Dans un contexte de défiance institutionnelle, cette situation – également liée à une structuration encore limitée des travaux de recherche sur cette thématique – a contribué à alimenter un climat de controverse autour du développement de l'éolien en

¹ Cette ESCo a été réalisée avec le soutien financier du ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle, énergétique et numérique.

mer, susceptible de fragiliser les conditions d'élaboration de la décision publique.

Ce contexte permet de comprendre à la fois la création de l'ONEM et le choix des commanditaires de saisir le CNRS et l'Ifremer afin de conduire une Expertise scientifique collective (ESCo). Par la rigueur, la robustesse et la transparence de sa méthodologie, ce type d'expertise constitue un instrument particulièrement mobilisé pour établir un état de l'art scientifique en appui à la décision publique en contexte de controverse (Caby, 2019 ; 2021).

Les ESCo reposent sur deux piliers complémentaires : un collectif pluridisciplinaire de scientifiques et l'analyse de la littérature scientifique internationale évaluée par les pairs, afin de dépasser le seul cadre de l'avis individuel d'experts. Conformément aux 4 principes qui régissent les ESCo – compétence, transparence, indépendance et impartialité – les experts ont été sélectionnés sur la base de leurs productions scientifiques et leurs liens d'intérêts analysés, afin de prévenir les risques de conflits d'intérêts tout en garantissant la diversité du collectif constitué.

La diversité des disciplines et des expertises réunies, combinée à l'examen collectif des publications scientifiques selon une méthode rigoureusement partagée, contribue à l'ambition d'impartialité au cœur de l'expertise. Enfin, la transparence exige une traçabilité des choix opérés par le collectif d'experts et les différents comités institutionnels ayant accompagné les travaux, ainsi qu'un partage public des résultats de l'ESCo.

Ainsi, si l'expérience apporte connaissances et expertise, la démonstration scientifique – fondée non sur une étude isolée mais sur la convergence de plusieurs travaux – permet d'établir un socle de connaissances qui fait de cet ancrage scientifique l'un des moyens d'éclairer la décision.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'ESCo « Éoliennes en mer & biodiversité », dont l'objectif est d'établir un état des connaissances scientifiques relatives aux effets des parcs éoliens en mer et de leurs raccordements sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers. L'analyse porte sur les acquis, les incertitudes et les principales lacunes de connaissances, ainsi que sur les mesures d'atténuation des effets et les conditions de transposabilité des résultats aux eaux hexagonales.

Cette expertise, conduite durant deux ans et demi, a mobilisé un collectif de 25 chercheurs issus de 13 organismes scientifiques. Elle repose sur une revue systématique de la littérature visant à garantir transparence, reproductibilité et limitation des biais d'analyse. Plus de 4 500 publications ont été identifiées ; 411 articles ont été retenus pour une analyse fine et détaillée.

L'ESCo adopte une approche par pressions. Une pression est entendue ici comme un mécanisme par lequel un parc éolien modifie le milieu marin au-delà de sa variabilité naturelle. Les effets observés résultent ainsi de l'interaction entre une pression et les organismes susceptibles d'y être exposés. Ce cadre permet de comparer des résultats issus de contextes variés et d'identifier des leviers d'atténuation mobilisables pour

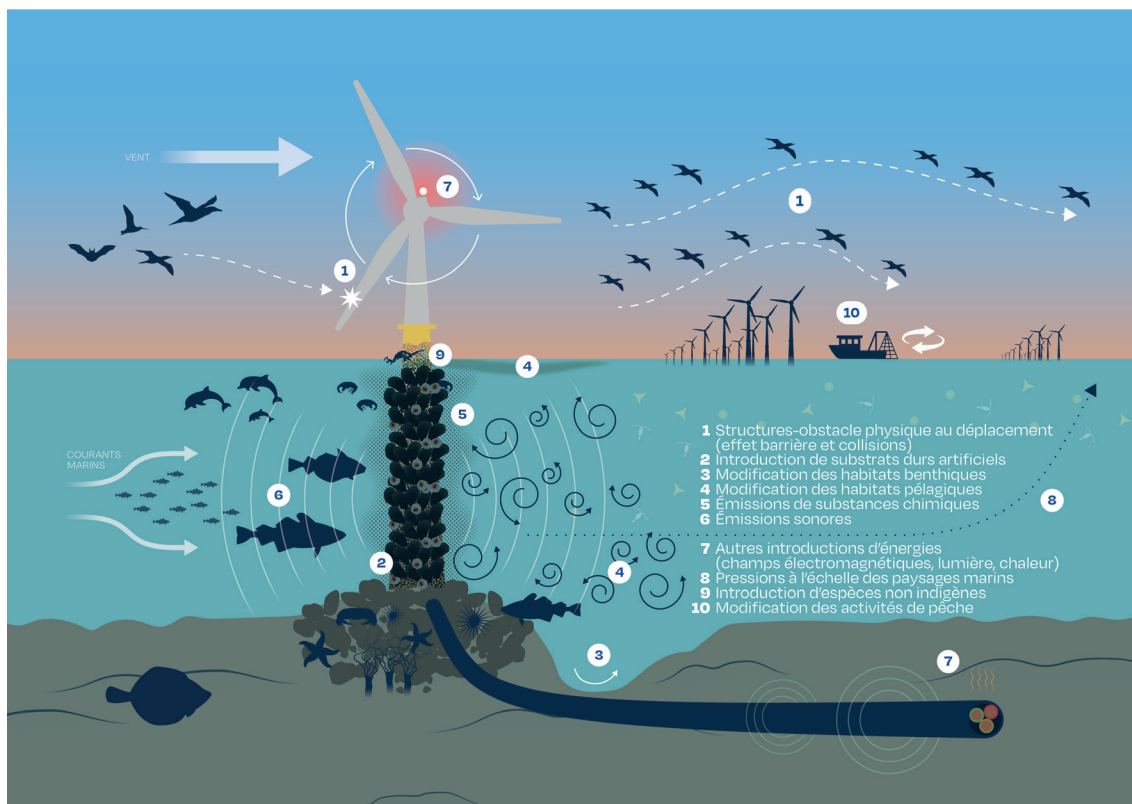


Figure 1 : Les dix pressions exercées par les parcs éoliens en mer analysées dans l'ESCo Éoliennes en mer & biodiversité. Crédit : J. Barrault (Source : Synthèse de l'ESCo).

l'action publique. L'analyse s'appuie également sur le cadre des Variables Essentielles de la Biodiversité (EBV), afin de caractériser les réponses observées à différents niveaux d'organisation biologique.

Le collectif a par ailleurs choisi de privilégier le terme d'« effet » à celui d'« impact », sans qualifier les effets observés de « positifs » ou de « négatifs ». Un même effet peut être interprété différemment selon le contexte, le niveau d'organisation biologique considéré ou les parties prenantes concernées.

Résultats par pressions

Les éoliennes : obstacles au déplacement d'espèces mobiles et supports pour l'installation d'organismes sous-marins

L'effet des éoliennes comme obstacles au déplacement est aujourd'hui bien documenté pour la faune volante, en particulier pour les oiseaux marins et migrateurs, chez lesquels des comportements d'évitement et de contournement sont fréquemment observés. Certaines espèces de chauves-souris migratrices pourraient également être exposées, même si les données disponibles restent limitées pour ce groupe. Les effets observés dépendent toutefois de nombreux paramètres : densité et disposition des turbines, conditions météorologiques, caractéristiques des espèces ou configuration des sites. Les connaissances demeurent en revanche beaucoup plus limitées concernant les effets d'obstacles sous-marins.

L'introduction de structures artificielles génère également un « effet récif » particulièrement documenté pour les organismes benthiques. Ces surfaces dures immergées sont colonisées par de nombreuses espèces, entraînant une augmentation locale de biomasse et une transformation profonde des communautés biologiques. Chez certains poissons une augmentation locale de l'abondance et parfois de la taille moyenne a également été observée. Ces modifications peuvent se répercuter à l'échelle des réseaux trophiques et du fonctionnement des écosystèmes. Les travaux disponibles suggèrent par ailleurs que cet effet pourrait, dans certains cas, contribuer à une production biologique locale au moins partielle, sans permettre à ce stade de conclure à une augmentation nette de la production biologique à l'échelle des populations ou des écosystèmes.

Autour des éoliennes : modification des habitats benthiques (fond marin) et pélagiques (colonne d'eau)

Les modifications des habitats du fond marin liées aux fondations et aux protections contre l'affouillement sont relativement bien documentées. Elles se traduisent par des changements de composition des communautés biologiques, souvent accompagnés d'une augmentation locale de la diversité et de la biomasse. Ces résultats concernent principalement des parcs implantés sur des sédiments meubles d'Europe du Nord ; leur trans-

posabilité dépend fortement des contextes considérés et du type de technologie implantée.

Dans la colonne d'eau, l'effet récif peut favoriser le développement d'organismes filtreurs en grande quantité, susceptibles de modifier localement la disponibilité du plancton. Les éoliennes peuvent également modifier les courants, la turbulence ou la stratification des masses d'eau. Les effets observés sur la production primaire demeurent toutefois variables, voire contradictoires. Les conséquences écologiques des panaches turbides observés autour de certains parcs restent encore insuffisamment documentées.

Les parcs éoliens : sources d'émissions chimiques, sonores et d'autres formes d'énergie

Les émissions de substances chimiques associées aux parcs éoliens demeurent peu étudiées. Les travaux disponibles portent principalement sur les anodes utilisées contre la corrosion des structures. Les effets décrits concernent surtout des réponses individuelles et localisées ; très peu d'études analysent les conséquences à l'échelle des populations ou des écosystèmes.

Les émissions sonores constituent, à l'inverse, l'une des pressions les mieux documentées, en particulier durant la phase de construction. Les effets observés concernent surtout le comportement, les déplacements et certaines fonctions physiologiques, notamment chez les mammifères marins. Les effets permanents sont toutefois plus rarement démontrés. Une large part des travaux se concentre sur le marsouin commun, ce qui limite la généralisation des résultats à l'ensemble des cétacés. Chez les poissons, les études portent surtout sur des réponses individuelles, rendant difficile l'évaluation des conséquences à l'échelle des populations.

D'autres formes d'énergie sont également introduites dans le milieu marin, notamment les champs électromagnétiques liés aux câbles électriques. Les études concluent souvent à une absence d'effet mesurable, mais certaines mettent en évidence des modifications de comportement ou de distribution spatiale ou de développement larvaire, notamment chez les requins et les raies. Les effets liés à la chaleur ou à la lumière artificielle restent, quant à eux, très peu étudiés.

À plus grande échelle : changements d'usages et modification des paysages marins (écosystèmes interconnectés)

La réduction ou l'interdiction de certaines activités de pêche à l'intérieur des parcs peut produire un « effet réserve ». Celui-ci est bien démontré pour les organismes vivant sur les fonds marins ainsi que pour certaines espèces de poissons peu mobiles. En revanche, l'existence d'un effet de débordement vers les zones voisines demeure encore mal documentée, faute de suivis suffisamment longs.

Les structures artificielles favorisent aussi l'installation locale d'espèces non indigènes. Si les parcs peuvent jouer un rôle de relais dans leur dispersion, les consé-

quences écologiques à grande échelle restent encore peu connues.

À l'échelle des paysages marins, les effets observés dépassent souvent la simple addition des effets locaux. Des dynamiques cumulatives, synergiques ou, plus largement, non additives sont mises en évidence, avec des réponses contrastées selon les groupes biologiques : augmentation de l'abondance pour certains poissons et invertébrés, diminution pour certains oiseaux et mammifères marins. Ces transformations pourraient modifier la connectivité écologique entre habitats marins et certaines dynamiques de fonctionnement des écosystèmes, mais les connaissances restent encore limitées, notamment concernant les dimensions génétiques et évolutives.

Mesures d'atténuation des effets

L'analyse de la littérature montre que les mesures d'atténuation documentées concernent principalement la réduction des effets, davantage que leur évitement ou leur compensation.

Les mesures les plus étudiées concernent la réduction des émissions sonores pendant les travaux pour les mammifères marins – notamment *via* les rideaux de bulles ou la montée progressive de la puissance sonore – ainsi que la limitation des risques de collision pour les oiseaux et les chauves-souris, par l'arrêt temporaire des turbines dans certaines conditions.

Toutefois, seule une part limitée des mesures recensées a fait l'objet d'une évaluation scientifique. Les travaux restent concentrés sur quelques groupes biologiques et pressions, ce qui limite l'évaluation de leur efficacité réelle en conditions opérationnelles et à long terme.

Lacunes de connaissances

L'expertise met en évidence plusieurs lacunes transversales.

Certaines pressions restent encore très peu étudiées, notamment les émissions chimiques, la lumière artificielle, les effets cumulés ou encore certains processus à l'échelle du paysage marin, tels que la connectivité. D'importants biais taxonomiques apparaissent également dans la littérature : certains groupes biologiques, comme les oiseaux ou les mammifères marins, sont largement étudiés, tandis que d'autres demeurent peu documentés.

Les données de long terme constituent une autre limite importante. La majorité des études porte sur des périodes relativement courtes, alors que les effets écologiques peuvent se manifester sur plusieurs décennies. Les connaissances sur le démantèlement des installations restent également très limitées, alors même que cette question deviendra de plus en plus centrale dans les prochaines années.

Enfin, la comparabilité des études demeure souvent difficile en raison de l'hétérogénéité des protocoles et des

méthodes mobilisés. Cette situation limite la robustesse des synthèses et la capacité à généraliser les résultats à d'autres contextes. L'expertise souligne également que la majorité des travaux disponibles concerne des parcs éoliens posés en mer du Nord, alors que certaines technologies plus récentes, comme l'éolien flottant, ainsi que certains contextes écologiques, notamment méditerranéens, restent encore faiblement documentés.

Conclusions et messages-clés

L'ESCO constitue à ce jour la synthèse scientifique la plus complète consacrée aux effets des parcs éoliens en mer sur la biodiversité marine. Trois pressions apparaissent particulièrement bien documentées dans la littérature : l'effet obstacle, les émissions sonores et l'effet récif artificiel. D'autres pressions, pourtant importantes pour une évaluation intégrée des effets, demeurent encore peu documentées.

Les résultats mettent en évidence des effets dont l'intensité et les conséquences varient fortement selon les contextes, les espèces considérées, les phases de développement des parcs et les caractéristiques technologiques des installations. Les connaissances disponibles documentent principalement des réponses observées à des échelles locales ou individuelles, tandis que les conséquences à long terme sur les populations, les réseaux trophiques et le fonctionnement des écosystèmes demeurent encore insuffisamment caractérisées. Malgré un corpus encore inégal selon les pressions et les groupes biologiques, des transformations de la biodiversité à long terme apparaissent plausibles dans un contexte de déploiement de l'éolien en mer, appelé à se poursuivre durablement.

L'expertise souligne également que la majorité des connaissances actuellement disponibles provient de parcs éoliens posés en mer du Nord et dans l'Atlantique Nord, ce qui conduit à considérer avec prudence la transposabilité des résultats à d'autres contextes écologiques, notamment aux eaux françaises méditerranéennes ou aux technologies flottantes.

Elle met enfin en évidence la nécessité de renforcer les suivis à long terme, de développer des approches intégrées tenant compte des effets cumulés et d'améliorer l'harmonisation des méthodes et des indicateurs de suivi, afin de renforcer la robustesse des connaissances disponibles et d'éclairer les décisions publiques relatives au déploiement de l'éolien en mer, sans se substituer aux choix de société auxquels elles renvoient.

Bibliographie

CABY V. (2019), *L'institution de l'expertise : Une analyse des déterminants, des usages politiques et de la crédibilité scientifique de l'expertise, à partir du cas des expertises collectives INSERM et INRA*, Thèse de doctorat soutenue en 2019 à Bordeaux sous la direction de Antoine Roger présidée par Andy Smith, membres du jury : Céline Granjou (Rapp.), Annabelle Littoz-Monnet (Rapp.), David Demortain et Claudio Maria Radaelli.

CABY V. (2021), « D'où vient l'expertise scientifique ? Inspirations, expérimentations, promotion et négociations dans la genèse de l'Expertise collective Inserm », *Sciences sociales et santé*, 39(2), pp. 5-32, <https://stm.cairn.info/revue-sciences-sociales-et-sante-2021-2-page-5?lang=fr>

CAZAUX E. (coord.), BACHER C. (coord.), NIQUIL N. (coord.), HEIGHTON S. (coord.), AUTHIER M., AYATA S.-D., BOEMARE C., CAPET A., CAPLAT C., CARLIER A., DAVIES P., DEGRAER S., DE GRISSAC S., GERNEZ P., JÉZÉQUEL Y., JUNG J.-L., KERBIRIOU C., LAMI R., LENFANT P., PIOCH S., RAOUX A., SENTCHEV A., SIMPLET L., THIRIET P., VIARD F. & VOGEL C. (2026), « Éoliennes en mer et biodiversité. Synthèse de l'expertise scientifique collective », Ifremer – CNRS (France).

IPBES (2019), "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services", E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz & H. T. Ngo (editors), IPBES secretariat, Bonn, Germany, 1 148 pages, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>

IPCC (2019), "IPCC Special Report on the ocean and cryosphere in a changing climate" [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pages, <https://doi.org/10.1017/9781009157964>

IPCC (2022), "Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change" [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem & B. Rama (eds.)], Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3 056 pages, <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Éolien en mer : effets et enjeux d'une nouvelle contrainte spatiale sur les pêcheries

Par Adeline BAS^a, Sophie LÉONARDI^a, Manuel BELLANGER^a,
Hélène BUCHHOLZER^b, Marjolaine FRÉSARD^b, Juliette JESTIN^b,
Pascal LE FLOC'H^b, Christelle Le GRAND^a, Célya MARTIAL^b,
Huixin WU^a & Olivier THÉBAUD^a

^a Ifremer, Université de Brest, CNRS, IRD, AMURE, Unité d'Économie Maritime, IUEM

^b Université de Brest, Ifremer, CNRS, IRD, AMURE, IUEM

L'expansion de l'éolien en mer, au cœur des stratégies énergétiques européenne et française, génère des interactions croissantes avec la pêche professionnelle. Si les impacts écologiques de ces infrastructures ont suscité un volume croissant de travaux de recherche, les dimensions économiques et sociales s'imposent désormais comme des enjeux de recherche majeurs.

Cet article expose quatre axes de recherche portés par l'Unité Mixte de Recherche AMURE, visant à produire des connaissances sur ces dimensions, susceptibles d'informer la planification du développement des parcs éoliens en mer.

Introduction

L'expansion de l'éolien en mer, au cœur des stratégies énergétiques européenne et française, génère des interactions croissantes avec la pêche professionnelle, activité historique et structurante des économies littorales (Gill *et al.*, 2020 ; ICES, 2025). Si les impacts écologiques de ces infrastructures ont suscité un volume croissant de travaux de recherche, les dimensions économiques – telles que la perte de revenus ou le déplacement de l'effort de pêche – et sociales s'imposent désormais comme des enjeux de recherche majeurs (Stelzenmüller *et al.*, 2020). Dans ce contexte, l'UMR AMURE développe des travaux multidisciplinaires visant à éclairer ces trajectoires de cohabitation. Ces recherches s'articulent autour de quatre volets complémentaires :

- l'analyse des impacts économiques cumulés des développements éoliens sur les pêcheries ;
- l'étude des conditions d'une coactivité entre pêche professionnelle et éolien ;
- l'évaluation de la vulnérabilité socio-économique des entreprises de pêche ;
- et l'analyse de l'acceptabilité sociale et des modalités de coordination intersectorielle.

Ces travaux visent à produire des connaissances critiques pour la planification spatiale maritime, qui accompagne l'élaboration de stratégies de développement des parcs éoliens en mer.

Analyse des impacts économiques cumulés des développements éoliens en mer sur les pêcheries

En France, comme dans la plupart des autres pays européens, l'approbation de nouveaux parcs éoliens repose sur des réglementations spécifiques dépendant des évaluations d'impact environnemental et de la localisation des parcs (voir aussi Bonsu *et al.* (2024) pour le contexte de la mer du Nord). Si les études d'impact environnemental doivent prendre en compte les effets cumulés des parcs éoliens existants ou en projet, les impacts économiques sur la pêche sont généralement traités par les développeurs à l'échelle de chaque parc éolien. La littérature scientifique sur l'évaluation des impacts économiques des parcs éoliens sur les pêcheries adopte souvent cette même perspective « projet par projet » (Thébaud et Boschetti, 2024).

Cette approche d'évaluation projet par projet présente au moins trois inconvénients. À chaque nouveau développement, l'évaluation des impacts économiques des parcs sur les pêcheries se concentre sur l'espace restant ouvert à la pêche, qui progressivement se rétrécit, sans jamais considérer le système dans son ensemble. Deuxièmement, les espaces qui ont déjà été développés sont, de fait, considérés comme des données acquises et leurs contributions aux impacts économiques cumulés sont donc exclues de l'évaluation. Une telle exclusion est susceptible d'affecter directement l'identification des responsabilités pour

Tableau 1 : Les principaux freins et moteurs à la coactivité entre parcs éoliens en mer et pêche professionnelle issus de la littérature.

	Freins	Moteurs
Politique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Concurrence avec les autres usagers de la mer pour l'accès aux infrastructures portuaires (Kafas, 2017). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Implication des représentants des pêcheurs dans les processus décisionnels et de concertation (de Groot <i>et al.</i>, 2014 ; Hooper <i>et al.</i>, 2015 ; Kafas, 2017) ➤ Amélioration de la gestion des pêches à l'intérieur et autour des parcs éoliens offshore (Kafas, 2017 ; Schupp <i>et al.</i>, 2021).
Environnementale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dégradation et impacts des habitats marins durant la phase de construction (Hooper <i>et al.</i>, 2015 ; Kafas, 2017) ➤ Évolution de l'abondance des ressources halieutiques (Hooper <i>et al.</i>, 2015 ; Kafas, 2017) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Effet récif potentiel (Bailey <i>et al.</i>, 2014 ; Kafas, 2017) ➤ Habitats artificiels, zones de nurserie, effet spill-over (Stelzenmüller <i>et al.</i>, 2021)
Sociale / Humain	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Risques pour la sécurité maritime liés à la navigation et aux opérations de pêche (Blyth-Skyrme, 2011 ; Christie <i>et al.</i>, 2014 ; Kafas, 2017). ➤ Faible confiance dans la capacité des pêcheurs à faire face à des conditions exceptionnelles (Schupp <i>et al.</i>, 2021). ➤ Émergence de conflits liés à la concurrence spatiale (ICES, 2025). ➤ Expérience et compétences de l'équipage (Hooper <i>et al.</i>, 2015 ; ICES, 2025). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Acceptation des pêcheurs face au changement (ICES, 2025).
Technologique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Compatibilité des infrastructures éoliennes avec les caractéristiques des engins et des opérations de pêche (ICES, 2025 ; Kafas, 2017 ; Schupp <i>et al.</i>, 2021 ; Szostek <i>et al.</i>, 2025). ➤ Risque d'accrochage des câbles lors de la récupération des engins perdus avec les grappins (Hooper <i>et al.</i>, 2015). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Opportunité pour l'innovation des méthodes de pêche (Kafas, 2017).
Économique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Coûts supplémentaires liés à l'augmentation des distances de navigation (carburant), aux équipements de pêche, à la perte d'engins de pêche (Kafas, 2017 ; Schupp <i>et al.</i>, 2021). 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Diversification des activités et des revenus (ex. : transport des équipes de maintenance) (Stelzenmüller <i>et al.</i>, 2021) ➤ Réduction des coûts grâce au partage des infrastructures portuaires entre secteurs (Kafas, 2017). ➤ Opportunités d'emplois et de diversification dans le secteur de l'énergie pour les marins pêcheurs (Kafas, 2017).
Légale	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Assurance et responsabilité (Blyth-Skyrme, 2011 ; Christie <i>et al.</i>, 2014 ; Hooper <i>et al.</i>, 2015). ➤ Absence de réglementation sur la sécurité de la pêche et de la navigation dans les parcs éoliens en mer (Bonsu <i>et al.</i>, 2024). ➤ Non détention de droit de pêche (Hooper <i>et al.</i>, 2015). 	/

ces impacts, s'ils existent. Troisièmement, l'acceptabilité sociale et les coûts des mesures compensatoires pour un même projet sont susceptibles de varier fortement, selon que des projets antérieurs ont été mis en œuvre ou non. Cette instabilité, observée dans d'autres contextes (Blanchard *et al.*, 2019) est susceptible de créer de l'incertitude pour tout nouveau projet de parc.

Une approche alternative consisterait à mettre en œuvre une évaluation stratégique des impacts de l'expansion éolienne, à l'échelle de régions de pêche entières, selon les principes de la gestion intégrée (Stephenson *et al.*, 2019). Une telle approche impliquerait d'examiner différentes stratégies de développement (en termes de localisation, de taille et de séquence de mise en place de parcs) et d'évaluer leurs conséquences pour les activités de pêche professionnelle (en tenant compte des réponses possibles de ces activités et des effets cumulés liés à ces réponses). Dans une approche de gestion adaptative, ce type d'évaluation stratégique pourrait informer le processus de sélection de plans de développement qui seraient ensuite mis en œuvre. Les impacts de ces plans pourraient être évalués, pour déboucher sur une éventuelle révision des stratégies. Dans une telle approche, une discussion collective approfondie sur les finalités de l'allocation des zones marines entre usages concurrents est requise, discussion qui fonde les critères (écologiques, économiques, sociaux) à prendre en compte dans l'évaluation. De nombreuses méthodes sont ensuite mobilisables pour conduire l'évaluation des arbitrages associés à différentes options d'aménagement (Thébaud *et al.*, 2026).

En France, l'évaluation stratégique du déploiement éolien en mer est menée sous l'angle des impacts environnementaux uniquement, incluant l'impact cumulé sur les ressources halieutiques. Aucun dispositif ne prévoit cependant l'évaluation des impacts économiques cumulés de l'éolien sur les pêcheries. La planification de l'espace maritime (PEM) serait le cadre le plus à même d'intégrer cette dimension. Sa démarche globale multi-sectorielle est en effet développée à l'échelle de chaque façade, croisant développement des activités en mer, impacts sur l'environnement et les autres activités, et ambitions de protection du milieu marin (Alloncle *et al.*, 2026, dans ce numéro). La concertation menée avec les acteurs du maritime doit en principe aboutir à des compromis sur la localisation des activités en mer (dont les zones éoliennes). Faut de connaissances fines et de méthodes pour évaluer les effets économiques cumulés croisés (éolien en mer - pêche, extraction de granulats - pêche, aire marine protégée - pêche, etc.), la prise en compte des impacts économiques cumulés sur les pêcheries demeure parcellaire.

Étude des possibilités d'une coactivité entre pêche professionnelle et éolien en mer

La coactivité entre pêche professionnelle et éolien en mer est l'une des nouvelles formes possibles de partage de l'espace maritime. Si les réglementations diffèrent selon les pays – de l'interdiction totale de

toute navigation et activité de pêche au sein des parcs éoliens en Belgique, à une pratique des arts dormants et traînants autorisée au Royaume-Uni ainsi qu'au Danemark – l'autorisation légale de pêcher dans les parcs éoliens ne garantit pas pour autant sa mise en œuvre opérationnelle, comme l'illustre le cas britannique, où les contraintes assurantielles demeurent dissuasives (Viennesse, 2022).

Une revue de littérature, principalement basée sur des cas d'étude européens en mer du Nord et suivant le cadre d'analyse PESTEL¹ (considérant les dimensions politiques, économiques, sociales, technologiques, environnementales et législatives (Bellanger *et al.*, 2025 ; Song *et al.*, 2017 ; Stuver *et al.*, 2016) met en évidence les principaux freins et moteurs de cette coactivité (*cf.* Tableau 1).

En France, une volonté forte de l'État de faciliter la poursuite des activités de pêche professionnelle au sein des parcs a présidé au développement du cadre réglementaire de l'éolien en mer. Ce contexte offre ainsi une opportunité de mettre en regard le cas français avec les freins et moteurs identifiés dans la littérature. Les recherches en cours concernent la diversité des réponses des professionnels de la pêche face à la reconfiguration du cadre spatial et réglementaire de leurs activités, dans le périmètre de ces parcs éoliens, dont les quatre parcs entrés récemment en exploitation². Les questions qui structurent ces recherches portent sur les représentations des pêcheurs professionnels concernant la pêche dans les parcs éoliens, et la manière dont ces représentations influencent leurs décisions d'y pêcher ou non : actionnent-ils effectivement leurs droits de pêcher dans les parcs ? Quels facteurs favorisent ou freinent cette coactivité ? Quelles stratégies d'adaptation sont déployées ? Par un travail d'enquête de terrain, il s'agit de mieux comprendre les déterminants opérationnels de la coactivité. Ces déterminants pourront être pris en compte dans des modèles de réponses des pêcheries aux développements éoliens en mer, utilisés pour examiner des scénarios alternatifs de déploiement des parcs et leurs conséquences possibles pour les pêcheries. Ils pourront également informer les approches d'aménagement de futurs parcs éoliens visant à faciliter la coactivité.

¹ Initialement mobilisée dans le monde de l'entreprise, PESTEL est une variante de l'analyse SWOT qui vient préciser les forces, faiblesses, opportunités et menaces relatives à six dimensions : politique, économique, sociale, technologique, environnementale et législative. Ce cadre est repris par la communauté scientifique notamment pour réaliser des diagnostics autour d'une problématique.

² Dates de mise en service des parcs éoliens : 2022 pour le parc de Saint-Nazaire, 2023 pour les parcs de Saint-Brieuc et de Fécamp et 2025 pour le parc des Îles d'Yeu et de Noirmoutier.

Évaluation de la vulnérabilité socio-économique des entreprises de pêche

Dans la perspective de mieux intégrer les effets sur la pêche de la concurrence spatiale dans la planification de l'éolien en mer, le cadre d'évaluation de la vulnérabilité du GIEC (IPCC, 2007) a été adapté pour mesurer la vulnérabilité spatiale des pêcheurs professionnels aux parcs éoliens (Buchholzer *et al.*, 2022). Ce cadre décompose la vulnérabilité en trois dimensions : l'exposition (réduction des zones de pêche liée à l'éolien), la sensibilité (la dépendance des flottilles aux zones concernées) et la capacité d'adaptation des pêcheurs qui permet de réduire les impacts négatifs de l'éolien.

Un travail spécifique a été conduit sur la capacité d'adaptation qui est fondée sur cinq types de capital, ou domaines de vulnérabilité – physique, naturel, financier, social et humain (Freduah *et al.*, 2019). À partir d'enquêtes menées auprès de pêcheurs professionnels en baie de Seine, des indicateurs du capital social et du capital humain ont en premier lieu pu être identifiés (Martial, 2024 ; Martial *et al.*, 2025). Les enquêtes révèlent le rôle significatif des facteurs non monétaires dans leur capacité d'adaptation, tels que l'attachement des professionnels à leur environnement, leur métier, ou encore leurs réseaux sociaux. Ainsi, l'appartenance à une famille de pêcheurs et le transfert générationnel des connaissances tacites jouent un rôle central dans la formation de la capacité d'adaptation des activités de pêche (capital humain). L'étude montre également que cette capacité repose sur un niveau de confiance plus fort entre un petit nombre de navires, pratiquant le même métier, et dont l'origine du réseau s'inscrit dans la cellule familiale ou dans une formation commune à l'école des pêches (capital social).

Un travail de validation de l'ensemble des indicateurs des cinq domaines définissant la capacité d'adaptation des pêcheurs a ensuite permis d'identifier un ensemble d'indicateurs pertinents pour la mesurer (Buchholzer *et al.*, in press), mettant en lumière les facteurs qui contribuent à la réaction potentielle des pêcheurs face à ce changement spatial. En contribuant à une meilleure compréhension de la capacité d'adaptation, ces travaux viennent enrichir les discussions en amont de la planification de l'éolien en mer, pour limiter les effets de la concurrence spatiale sur les pêcheries.

Étude de l'acceptabilité sociale et des modalités de coordination intersectorielle

L'arrivée d'un parc éolien en mer vient bousculer la nature et la dynamique des interactions entre acteurs, conduisant à les remodeler *via* des processus d'appropriation (Mazeaud *et al.*, 2022). Ces processus sont négociés, à la croisée de logiques *top-down* (*i.e.* des politiques intégrant explicitement les contextes locaux) et *bottom-up* (*i.e.* la manière dont les acteurs locaux

et régionaux élaborent des stratégies de réappropriation de cadres nationaux) (Evrard et Pasquier, 2019). La compensation territoriale, composée d'un ensemble de mesures de nature différente (compensation écologique, compensation économique, mesures socio-culturelles, mesures réglementaires, mesures volontaires, etc.), constitue l'un des objets négociés lors de ces processus d'appropriation. Cette compensation territoriale peut favoriser l'acceptabilité des projets d'aménagement (Oiry, 2015). Elle participe également à une dynamique plus large de territorialisation de l'intérêt général promu par les projets d'aménagement, c'est-à-dire à l'élaboration d'un compromis conciliant l'intérêt général et les enjeux des territoires au sein desquels ces projets se réalisent (Beuret, 2016).

Cette question a été examinée dans le contexte du parc éolien de Saint-Brieuc (Jestin *et al.*, submitted). À partir d'une série d'entretiens, une analyse des jeux d'acteurs et des rapports de pouvoir autour de la compensation territoriale, entre le secteur de la pêche, les services de l'État et le développeur, a été réalisée. L'étude montre le rôle central du secteur de la pêche dans les premières phases du projet éolien, notamment à travers la concertation et la négociation de mesures compensatoires et d'accompagnement. L'influence des professionnels de la pêche s'inscrit dans un processus d'appropriation du parc par ces acteurs (Beuret *et al.*, 2025). La pêche est en effet perçue par l'État et le développeur comme étant un acteur crucial, potentiellement bloquant. À Saint-Brieuc, le secteur de la pêche occupe une place importante tant sur le plan culturel et symbolique que politique. La capacité d'influence du secteur de la pêche reste toutefois structurellement limitée par le contrôle exercé par l'État et le développeur, qui conservent la maîtrise des décisions finales. Le cas de Saint-Brieuc illustre ainsi les tensions entre participation locale, objectifs et gouvernance des politiques énergétiques fixés et pilotés par l'État et acceptation des projets éoliens en mer. Il contribue également aux discussions sur la capacité des acteurs locaux à agir dans la gouvernance des infrastructures énergétiques (Poupeau, 2013).

Conclusion

Le déploiement de l'éolien en mer en Europe et en France induit une nouvelle concurrence spatiale pour la pêche professionnelle, source potentielle d'impacts économiques et sociaux. Les recherches sur ces enjeux clés de la planification spatiale en mer restent aujourd'hui en retrait par rapport aux impacts environnementaux (dont les ressources halieutiques), objets d'un volume conséquent de travaux³. Les recherches menées à l'UMR AMURE visent à éclairer ces enjeux

³ Comme en témoigne les résultats de l'expertise scientifique collective (2026) portée par le CNRS et Ifremer sur les effets environnementaux de l'éolien en mer (Cazaux *et al.*, 2026, dans ce numéro).

en croisant des approches à différentes échelles spatiales (du parc éolien jusqu'à la façade maritime) et temporelles (de la planification à la construction et à l'exploitation des parcs), en considérant aussi différentes technologies (éolien posé ou flottant). L'objectif est de mieux comprendre les réponses des professionnels de la pêche et les effets économiques et sociaux qui en découlent. Ces travaux permettront de mieux représenter les réponses possibles de la pêche, dans des scénarios simulant les effets des contraintes spatiales associées à l'éolien, aux côtés d'autres contraintes spatiales avec lesquelles l'évolution du secteur doit composer. Conduites dans une perspective d'évaluation intégrée, ces recherches visent à informer le processus de planification des activités en mer, dont l'éolien *offshore*.

Références

- ALLONCLE N., BAS A. & JACOB C. (2026), « La planification de l'espace maritime comme levier des transitions socio-environnementales ? », *Les Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, juillet 2026 – ce numéro.
- BELLANGER M., SCEMAMA P., BAILLY D., FRIEDMAN S., MASSÉ U., RICHARD J. & THÉBAUD O. (2025), "A stakeholder perspective on the drivers and barriers influencing the emergence of deep-sea mining", *Resources Policy*, 105. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105623>
- BEURET J.-E. (2016), « La confiance est-elle négociable ? La construction d'un intérêt général territorialisé pour l'acceptation des parcs éoliens offshore de Saint Brieuc et Saint Nazaire », *Géographie, économie, société*, 18(3), pp. 335-358. <https://doi.org/10.3166/ges.18.335-358>
- BEURET J.-E., JESTIN J. & BAS A. (2025), « Le concept d'acceptation sociale à l'épreuve d'un conflit : pêche et éolien offshore en baie de Saint-Brieuc. Développement durable et territoires », *Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 16(1).
- BLANCHARD F., CHABOUD C. & THÉBAUD O. (2019), "Back to the future: A retrospective assessment of model-based scenarios for the management of the shrimp fishery in French Guiana facing global change", *Natural Resource Modeling*, 32(4), <https://doi.org/10.1111/nrm.12232>
- BONSU P. O., LETSCHERT J., YATES K. L., SVENDSEN J. C., BERKENHAGEN J., ROZEMEIJER M. J. C., KERKHOVE T. R. H., REHREN J. & STELZENMÜLLER V. (2024), "Co-location of fisheries and offshore wind farms: Current practices and enabling conditions in the North Sea", *Marine Policy*, 159, 105941, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105941>
- BUCHHOLZER H., FRÉSARD M., LE GRAND C. & LE FLOC'H P. (2022), "Vulnerability and spatial competition: The case of fisheries and offshore wind projects", *Ecological Economics*, 197, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107454>
- BUCHHOLZER H., MARTIA C., FRÉSARD M. & LE FLOC'H P. (in press), "Adaptive capacity of fishing companies facing spatial competition with offshore wind farms: insights from scallop fishers in Normandy (France)", *Ecology & Society*.
- CAZAUX E., BACHER C., NIQUIL N. (Coord.) *et al.* (2026), « L'expertise scientifique collective (ESCo) sur les effets de l'éolien en mer sur la biodiversité », *Annales des Mines – Responsabilité & Environnement*, juillet 2026 – ce numéro.
- EVARD A. & PASQUIER R. (2019), « Territorialiser la politique de l'éolien maritime en France », *Gouvernement et action publique*, vol. 7(4), pp. 63-91, <https://doi.org/10.3917/gap.184.0063>
- FREDUAH G., FIDELMAN P. & SMITH T. F. (2019), "A framework for assessing adaptive capacity to multiple climatic and non-climatic stressors in small-scale fisheries", *Environmental Science & Policy*, 101, pp. 87-93, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.07.016>
- GILLA., DEGRAER S., LIPSKYA., MAVRAKIN., METHRATTA E. & BRABANT R. (2020), "Setting the context for offshore wind development effects on fish and fisheries", *Oceanography*, 33(4), pp. 118-127, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.411>
- ICES (2025), "Workshop to compile evidence on the impacts of offshore renewable energy on fisheries and marine ecosystems (WKCOMPORE)", *ICES Scientific Reports*, 7(45), 283 pages, <https://doi.org/10.17895/ices.pub.28759259>
- IPCC (2007), "Climate change 2007: Synthesis report", Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core writing team, Pachauri, R.K and Reisinger, A.(eds.)], IPCC, Switzerland.
- JESTIN J., BAS A. & BELLANGER M. (submitted), "Power Dynamics and the Local Integration of the Saint-Brieuc (France) Offshore Wind Farm: The Case of the Commercial Fishing Sector", *Maritime Studies*.
- MARTIAL C. (2024), *Approche critique de la méthode de la vulnérabilité : application aux pêcheries normandes face aux parcs éoliens en mer*, Mémoire de fin d'études.
- MARTIAL C., BUCHHOLZER H., FRÉSARD M., LÉONARDI S. & LE FLOC'H P. (2025), « Pêche - Rapport intermédiaire R3 - projet EOENMER ».
- MAZEAUD A., AULAGNIER A., SMITH A. & COMPAGNON D. (2022), « La territorialisation de l'action climatique », *Pôle Sud*, 57(2), pp. 5-20, <https://doi.org/10.3917/psud.057.0005>
- OIRY A. (2015), Conflits et stratégies d'acceptabilité sociale autour des énergies marines renouvelables sur le littoral français. *Vertigo*, 15-3, <https://doi.org/10.4000/vertigo.16724>
- POUPEAU F. M. (2013), "Central-local relations in French energy policy-making: Towards a new pattern of territorial governance", *Environmental Policy and Governance*, 24(3), pp. 155-168, <https://doi.org/10.1002/eet.1637>
- SONG J., SUN Y. & JIN, L. (2017), "PESTEL analysis of the development of the waste-to-energy incineration industry in China", *Renewable and sustainable energy reviews*, 80, pp. 276-289, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.066>
- STELZENMÜLLER V., GIMPEL A., LETSCHERT J., KRAAN C. & DÖRING R. (2020), "Research for PECH Committee – Impact of the use of offshore wind and other marine renewables on European fisheries".
- STEPHENSON R. L., HOBDAV A. J., CVITANOVIC C., ALEXANDER K. A., BEGG G. A., BUSTAMANTE R. H., DUNSTAN P. K., FRUSHER S., FUDGE M., FULTON E. A., HAWARD M., MACLEOD C., MCDONALD J., NASH K. L., OGIER E., PECL G., PLAGÁNYI É. E., VAN PUTTEN I., SMITH T. & WARD T. M. (2019), "A practical framework for implementing and evaluating integrated management of marine activities", *Ocean & Coastal Management*, 177, pp. 127-138, <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.04.008>
- STUIVER M., SOMA K., KOUNDOURI P., BURG S. V. D., GERRITSEN A., HARKAMP T., DALSGAARD N., ZAGONARI F., GUANCHER., SCHOUTEN J.-J., HOMMESS., GIANNOULI A., SÖDERQVIST T., ROSEN L., GARÇÃO R., NORRMAN J., RÖCKMANN C., BEL M. D., ZANUTTIGH B., MØHLENBERG F. *et al.* (2016), "The governance of multi-use platforms at sea for energy production and aquaculture: Challenges for policy makers in European seas", *Sustainability*, 8(4), <https://doi.org/10.3390/su8040333>

THÉBAUD O. & BOSCHETTI F. (2024), "A tale of two sectors: Offshore wind and fisheries out for a row in the ocean", *Journal of Environmental Management*, 359, 121060, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121060>

THÉBAUD O., PASCOE S., DEPIPER G., HOLZER J., AGNARSSON S., CASTILLA-ESPINO D., CURTIN R., GOURGUET S., HAMON K. G., HAYNIE A., KOURANTIDOU M., MACHER C., MURILLAS A., NIELSEN R., VAN OOSTENBRUGGE J. A. E., PIRRONE C., PFEIFFER L., ROSA R., SANTIAGO J.-L., TOKUNAGA K. *et al.* (2026), "A guide to navigating the complexities of quantitative trade-off analysis", *ICES Journal of Marine Science*, 83(5), <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsag077>

VIENNESSE L. (2022), « La réglementation de la navigation et usages aux abords et à l'intérieur des parcs éoliens en mer, Étude comparée de parcs étrangers en exploitation », <https://doc.cerema.fr/Default/doc/SYRACUSE/592031/la-reglementation-de-la-navigation-et-usages-aux-abords-et-a-l-interieur-des-parcs-eoliens-en-mer-et>

L'hydrolien : une nouvelle filière pour accélérer la transition énergétique française ?

Par Grégory GERMAIN

Laboratoire d'Hydrodynamique Marine de l'Ifremer ; laboratoire commun Verti-Lab

Christophe MAISONDIEU

Responsable du laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'Ifremer

& Marion CUIF

Direction Générale Déléguée à la stratégie de l'Ifremer, programme « Énergies marines renouvelables »

Les énergies marines contribuent au mix énergétique de nombreux pays. Parmi celles-ci, l'énergie cinétique des courants de marée offre un potentiel de développement non négligeable avec comme atout essentiel, une très bonne prédictibilité et une concentration de l'énergie en zone côtière. Cette énergie est captée et transformée en électricité par des hydroliennes, turbines basées sur les mêmes principes de fonctionnement que les éoliennes.

Aujourd'hui, les premiers parcs industriels se développent au Royaume-Uni et les premières fermes pilotes devraient être déployées sur les côtes françaises d'ici 2030. Nous dressons dans cet article un état des lieux des principaux développements en cours.

Qu'est-ce que l'énergie des courants de marée ?

L'énergie cinétique des courants de marée est une énergie renouvelable et prédictible car elle dépend des marées, principalement liées aux forces gravitationnelles de la Lune et du Soleil, ainsi qu'aux forces d'inertie dues à la rotation de la Terre. Cette énergie offre un potentiel de développement non négligeable, avec une concentration de l'énergie en zone côtière.

Le potentiel exploitable de la ressource hydrolienne globale est estimé à quelques 120 GW, dont environ 20 GW dans les eaux européennes et du Royaume-Uni. Le potentiel français est d'environ 5 GW¹, répar-

tis essentiellement entre les zones de la péninsule du Cotentin (raz Blanchard – voir la Figure 1 et raz de Barfleur) et de la Bretagne (Fromveur, Paimpol-Bréhat et raz de Sein). À l'échelle mondiale, les autres zones à fort potentiel sont identifiées essentiellement au Canada, aux États-Unis, en Patagonie (Chili et Argentine), en Nouvelle-Zélande, ainsi qu'en Indonésie, en Corée du Sud, au Japon et en Chine.

L'énergie des courants de marée est captée et transformée en électricité par des hydroliennes, turbines basées sur les mêmes principes de fonctionnement que les éoliennes. La densité de l'eau étant environ mille fois supérieure à celle de l'air, la surface de captation des hydroliennes est divisée par un facteur dix par rapport à celle des éoliennes pour une même puissance installée. À la différence des éoliennes, les hydroliennes immergées sont majoritairement invisibles. La difficulté réside dans leur installation sous l'eau, dans des zones de forts courants, et leur fonctionnement sous des sollicitations particulièrement variables, car en faible profondeur d'eau (installation dans des zones de 20 à 50 mètres de profondeur pour des hydroliennes de plusieurs MW installés). Les conditions de fonctionnement rencontrées par les hydroliennes sont synthétisées sur la Figure 2 : des courants fluctuants, tant en intensité qu'en direction, avec un gradient vertical de vitesse non négligeable ; des sollicitations cycliques imposées par

¹ La programmation pluriannuelle de l'énergie rendue publique en février 2026, mentionne une puissance électrique installée de 170 GW en 2030. S'agissant de l'hydrolien, elle mentionne « un appel d'offres hydrolien de 250 MW sera lancé au raz Blanchard, avec un objectif d'attribution d'ici à 2030. Selon les résultats du premier appel d'offres et l'évolution des coûts de la technologie, un ou plusieurs appels d'offres complémentaires pourront être lancés, notamment sur la même zone. La temporalité sera précisée en fonction des études réseaux lancées par RTE pour le raccordement de ces projets. La conduite de ces projets aura lieu en assurant un haut niveau de prise en compte des enjeux environnementaux, notamment vis-à-vis de l'avifaune, et de pêche », <https://www.economie.gouv.fr/files/files/2026/ppe3.pdf?v=1772447721>

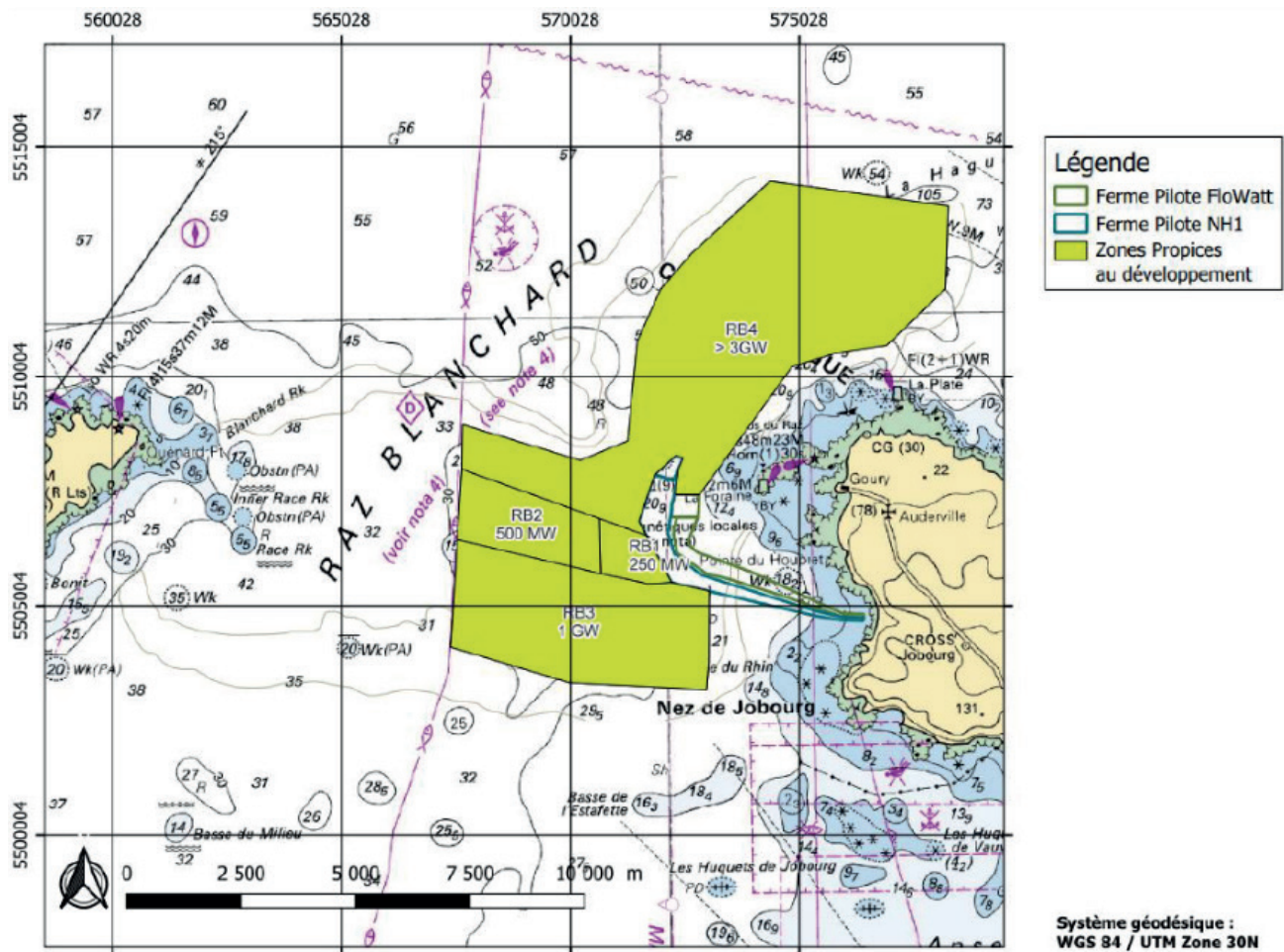


Figure 1 : Répartition géographique du potentiel hydrolien estimé au raz Blanchard (Source : Syndicat des Énergies Renouvelables).

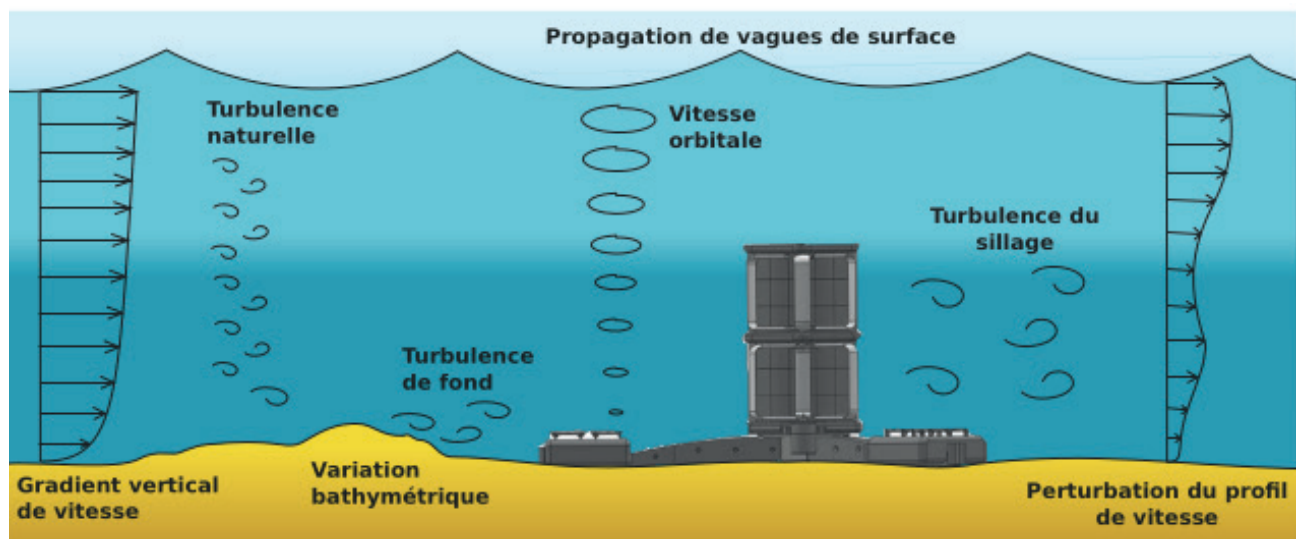


Figure 2 : Représentation schématique des conditions pouvant être rencontrées sur un site hydrolien : l'hydrolienne développée par HydroQuest pour le projet FloWatt est ici représentée à l'échelle (Source : Ifremer).

la houle pouvant devenir prédominantes en conditions de tempêtes ; des phénomènes fortement turbulents dus aux interactions entre le courant et les rugosités

des fonds marins ou les variations du trait de côte. Ces conditions rendent complexe le développement de ces technologies.

Les principaux projets en cours et les travaux de R&D nécessaires au développement de la filière

Si les hydroliennes monoturbines tripales à axe horizontal sont les plus répandues, différents types de technologies sont en cours de développement : avec des profils de pales ou des rotors fixes ou orientables pour s'adapter aux variations d'intensité du courant et/ou suivre les changements de direction du courant, mono ou multi-rotors pour réduire les coûts de fabrication, à axe de rotation horizontal ou vertical, posées sur le fond ou fixées sur des supports flottants. Des solutions innovantes en cours de développement, visant à déployer des turbines sur des profils portants, type cerfs-volants, pourraient offrir l'avantage d'exploiter les courants dans des zones moins énergétiques.

Cette activité industrielle, encore relativement récente, nécessite d'importants investissements initiaux, tant en R&D qu'en développement des procédés de fabrication et de déploiement. Aujourd'hui, la caractérisation fine des courants moyens et de la turbulence reste essentielle pour l'évaluation des ressources énergétiques des courants de marée (Thiébot *et al.*, 2026), la conception et la certification des hydroliennes, et pour réduire l'incertitude dans l'évaluation des performances et des chargements structurels (Moreau *et al.*, 2022). Les études sur le vieillissement en eau de mer des matériaux composites montrent que plusieurs mécanismes contribuent à la dégradation de leurs performances. Parmi ces mécanismes figurent la diminution de la température de transition vitreuse due à la diffusion de l'eau dans la résine, ainsi que la réduction de la résistance et du module de flexion lorsque l'eau interagit avec l'interface fibre/matrice. Le vieillissement en milieu marin a également un impact significatif sur la durée de vie en fatigue des matériaux composites (Davies *et al.*, 2022). C'est un sujet d'étude qui reste d'actualité pour garantir la durée de vie des hydroliennes estimée à une vingtaine d'année d'exploitation. La disponibilité des moyens nautiques nécessaires au déploiement de ces machines de plusieurs centaines de tonnes joue également sur la rentabilité économique de cette filière. En dépit du déploiement d'un certain nombre de démonstrateurs à l'échelle mondiale, comme la station LHD de Zhoustan en Chine (1,6 MW), l'essentiel des développements sont portés par des pays européens et par le Royaume-Uni. Depuis une quinzaine d'années,

le cumul de la capacité installée (Europe et Royaume-Uni) s'élève à environ 32 MW, dont 13 MW encore opérationnels, pour une production totale sensiblement supérieure à 100 GWh (source IEA/OES, *Stats & Trends 2024*).

Mis en service en 2018, le parc hydrolien MeyGen (dans le détroit de Pentland Firth, entre les îles Orcades et le nord de l'Écosse) a atteint une production cumulée de 84 GWh en novembre 2025. Quatre hydroliennes (tripales à axe horizontal) sont actuellement installées : trois turbines AH1000 MK1 d'Andritz Hydro Hamnerfest et une turbine AR1500 de Proteus Marine Renewables. L'installation prochaine d'hydroliennes de 3 MW devrait permettre d'augmenter sensiblement les capacités de production sur ce site. À noter qu'en 2025, Proteus Marine Renewables a installé dans le détroit de Naru, au Japon, une turbine AR1100 après y avoir testé une turbine AR500 pendant un an. Ces deux projets montrent que le retour d'expérience sur site est crucial pour mener à bien des développements d'envergure.

En France, après plusieurs décennies d'incertitudes, les premières fermes pilotes d'hydroliennes devraient prochainement entrer en phase de déploiement au raz Blanchard. Deux projets sont actuellement en cours de développement : FloWatt et NH1, portés respectivement par le consortium FloWatt (Qair, CMN, HydroQuest) et Normandie Hydroliennes (Proteus, Efinor, Normandie Participations). Ces deux projets sont basés sur des technologies différentes (voir la Figure 3) : 4 hydroliennes tripales à axe horizontal de puissance unitaire de 2 MW AR2000 de Proteus Marine Renewables pour le projet porté par Normandie Hydroliennes (NH1), et 6 hydroliennes HydroQuest quadrirotors à axe vertical de puissance unitaire de 2,8 MW pour le projet porté par FloWatt. L'électricité produite sera collectée à terre car les puissances en jeu le permettent. Les fermes seront donc connectées au réseau par câble sous-marin, sans sous-station électrique intermédiaire en mer.

Cependant, pour les parcs de plus grande capacité, la problématique des sous-stations électriques, relais indispensable au transfert des fortes puissances à terre, se posera au même titre que pour les parcs éoliens en mer. La captation de l'énergie ayant lieu sur une proportion importante de la colonne d'eau (de la moitié aux deux tiers de la profondeur du site), les effets de sillage seront quant à eux conséquents, notamment pour des déploiements de plusieurs dizaines de turbines. Comme pour l'éolien, les effets d'interaction entre machines



Figure 3 : Illustration des fermes pilotes NH1 à gauche et FloWatt à droite (Sources : Normandie Hydroliennes et FloWatt).

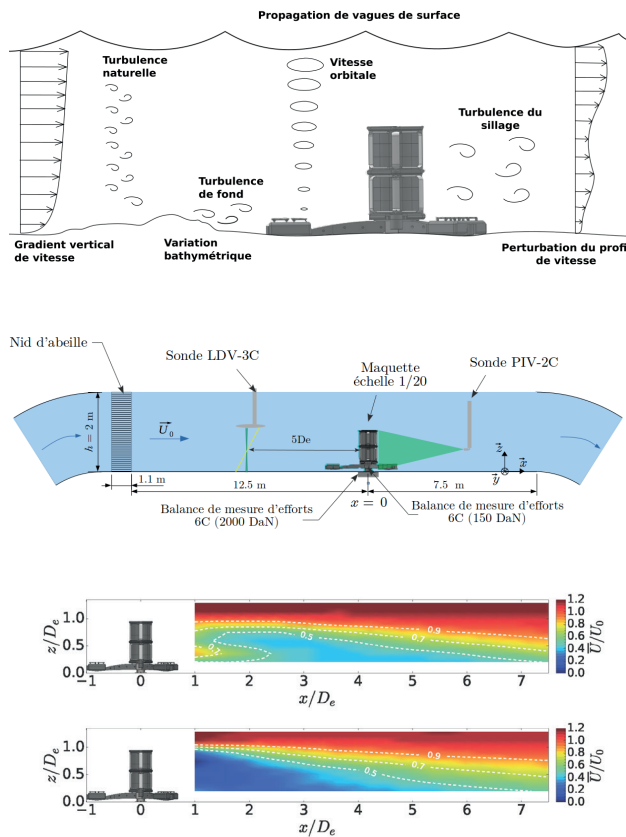


Figure 4 : Illustration de la démarche expérimentale menée pour caractériser le développement du sillage d'une hydrolienne (ici une turbine à axe vertical développée par HydroQuest), depuis la contextualisation du problème (en haut), le développement d'un dispositif expérimental (à l'échelle 1/20, au centre), jusqu'à l'analyse des résultats (en bas) (Source : Ifremer).

(Mycek *et al.*, 2015) devront être correctement appréhendés et pris en compte pour le développement de parcs de grandes puissances. Des études sont actuellement en cours pour caractériser finement les sillages émis par les hydroliennes (*cf.* Figure 4) afin de proposer une paramétrisation exploitable dans les modèles hydrodynamiques régionaux et globaux (Germain *et al.*, 2026).

Ainsi, il est primordial de poursuivre les travaux de recherches en cours, mêlant mesures *in situ* (Huchet *et al.*, 2023) et modélisation expérimentale (Linant *et al.*, 2026) et numérique (Dufour *et al.*, 2024), afin de disposer d'outils de dimensionnement et d'évaluation du productible fiables. En effet, seules la complémentarité et la possibilité d'intercomparaisons offertes par le triptyque « études expérimentales, modélisation numérique et mesures *in situ* » permettent d'avoir un niveau de confiance suffisant dans les résultats obtenus. Les mesures *in situ* sont souvent incomplètes, car difficiles à obtenir ; l'extrapolation des résultats expérimentaux à l'échelle réelle peut être complexe, mais ces deux jeux de données sont indispensables à la bonne validation des modèles numériques avant toute utilisation « systématique » en R&D.

Interactions des hydroliennes avec les écosystèmes marins

Pour concevoir des structures respectueuses de l'environnement, la compréhension de leurs interactions avec les écosystèmes marins est cruciale. C'est l'objectif du projet OES-Environmental lancé en 2010 par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA-OES). Ce projet, dirigé par le Département américain de l'Énergie et mis en œuvre par le Pacific Northwest National Laboratory, vise à accélérer l'exploitation responsable des énergies marines (hors éolien) en synthétisant les résultats des recherches mondiales sur les effets que ces technologies peuvent avoir sur l'environnement.

Dans leur dernier rapport de 2024, Garaveli *et al.* (2024) ont identifié plusieurs risques majeurs, au premier rang desquels figure la collision entre la faune et les pales des turbines. Ce point reste le principal obstacle à l'approbation des projets. Bien que des mammifères marins aient été observés en train d'éviter les turbines et que les oiseaux plongeurs semblent rester à distance, les données manquent encore. Si les modèles numériques (notamment individu-centrés) s'affinent, le faible nombre de déploiements réels limite la collecte de données en « champ proche ». Des recherches supplémentaires sont donc indispensables avant d'écartier formellement ce risque. D'autres pressions physiques font l'objet d'études. Les suivis actuels suggèrent notamment que les émissions acoustiques des dispositifs isolés ou des petites fermes hydroliennes ne sont pas susceptibles de nuire à la faune sous-marine. Les effets des champs électromagnétiques émis par les câbles de raccordement restent peu évalués en milieu naturel. Si des tests en laboratoire montrent des changements comportementaux chez certaines espèces sensibles (requins, raies, crustacés), les émissions réelles sont généralement jugées inférieures au seuil de risque significatif. Par ailleurs, les modèles numériques et les études de terrain semblent indiquer que les modifications océanographiques (hauteur des vagues, circulation d'eau) induites par quelques turbines restent inférieurs à la variabilité naturelle du système.

L'industrie hydrolienne évolue désormais vers des installations commerciales de grande capacité. Ce changement d'échelle impose d'appréhender les risques sur des dimensions spatiales et temporelles plus larges. L'impact des fermes d'hydroliennes sur l'environnement devra donc faire l'objet de travaux de recherche spécifiques, car les effets de ces machines tournantes sur l'hydrodynamique marine, la pollution chimique de l'eau et sur les premiers niveaux de la chaîne alimentaire, ainsi que sur les ressources halieutiques demeurent mal connus. Les retours d'expérience des premières fermes déployées en Écosse permettront d'orienter les études à mener au raz Blanchard. La proximité des concessions FloWatt et NH1 dans une zone où les activités humaines sont fortement développées va engendrer des effets cumulés qu'il est indispensable de bien quantifier. Qualifier à l'échelle régionale les impacts cumulés des différents usages sur l'environnement et l'économie locale est un enjeu de recherche majeur et nécessite l'acquisition et l'analyse, sur le long terme, de

données de terrain acquises selon des protocoles standardisés, ainsi que le développement de modèles écosystémiques dans lesquels les phénomènes physiques sont correctement représentés pour prévoir les évolutions futures (Huang *et al.*, 2025). Ce sujet est essentiel pour anticiper le développement de la filière, lié notamment à l'appel d'offres commercial de 250 MW au raz Blanchard, qui devrait être attribué d'ici 2030 (PPE 3 du 12 février 2026).

Bibliographie

- DAVIES P., DUMERGUE N., ARHANT M., NICOLAS E., PABOEUF S. & MAYORGA P. (2022), "Material and structural testing to improve composite tidal turbine blade reliability", *Int. Marine Energy Journal*, <https://doi.org/10.36688/imej.5.57-65>
- DUFOUR MA., PINON G., GERMAIN G. & RIVOALEN E. (2024), "Influence of wake interaction on three turbines facing a turbulent upstream flow", *Torques 2024*, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2767/5/052017>
- GARAVELLI L., COPPING A.E., HEMERY L.G. & FREEMAN M.C. (2024), "OES-Environmental 2024 State of the Science report: Environmental effects of marine renewable energy development around the world", Report for Ocean Energy Systems (OES), <https://doi.org/10.2172/2438585>
- GERMAIN G. *et al.* (2026), "Verti-Lab a common laboratory to improve vertical axis turbine developments", <https://vertilab.ifremer.fr/>
- HUCHET M., DRONIOU E., PEREZ L., JOHNSON F., BALDOCK A., VERMEULEN B. & BOAKE C. (2023), "Wake characterization of tidal turbines in the Pentland Firth using vessel-mounted ADCP measurements", *EWTEC*, <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-456>
- HUANG Y., GIRARDIN R., OLIVEROS-RAMOS R., TRAVERS-TROLET M., QUENNEVAT A., SAFI G., BEN RAIS LASRAM F. & HALOUANI G. (2025), "An ecosystem modelling approach to assess potential impacts of offshore wind farms", *ICES Journal of Marine Science*, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaf153>
- LINANT R., GERMAIN G., SAOULI Y., GAURIER B., FACQ JV., PENISSON C. & MAURICE G. (2026), "Vertical axis tidal turbine behaviour under sheared flow effects", *Marine Energy Research*, <https://doi.org/10.70322/mer.2025.10022>
- MOREAU M., GERMAIN G., MAURICE G. & RICHARD A. (2022), "Sea states influence on the behavior of a bottom mounted full-scale twin vertical axis tidal turbine", *Ocean Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112582>
- MYCEK P., GERMAIN G., GAURIER B., PINON G. & RIVOALEN E. (2015), "Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour", *Renewable Energy*, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00175/28647/27171.pdf>
- THIÉBOT J., GOEURY C., TRAVERT J.-P., SEBASTIAN A., SALOMON J. (2026), "The contribution of sensitivity analysis and data assimilation to tidal-stream resource assessment: The example of the Alderney Race", *Applied Ocean Research*, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2026.104970>

La planification de l'espace maritime comme levier des transitions socio-environnementales ?

Par Neil ALLONCLE

CEREMA, direction Technique Risques Eaux et Mer

Adeline BAS & Céline JACOB

Ifremer, Université de Brest, CNRS, IRD, AMURE, IUEM

La Politique Maritime Intégrée européenne vise à concilier développement économique et protection des milieux marins face au phénomène d'« accélération bleue ». En France, cette politique est mise en œuvre à travers la Stratégie Nationale Mer et Littoral et les Documents Stratégiques de Façade, qui organisent les usages maritimes en intégrant enjeux environnementaux, sociaux et économiques. Initialement déployé en parallèle de la planification de l'espace maritime, le développement de l'éolien en mer a progressivement été intégré aux Documents Stratégiques de Façade, notamment grâce à la loi APER de 2023. À travers le cas de l'éolien *offshore*, cet article montre comment cette intégration permet une meilleure prise en compte des impacts environnementaux cumulés et des interactions avec d'autres activités comme la pêche. Toutefois, des limites persistent : connaissances insuffisantes sur les impacts, procédures administratives séparées et participation des acteurs ne permettant pas une réelle co-construction de visions, d'objectifs et d'actions.

Introduction

Jusqu'en 2007, la gestion des usages en mer au niveau européen fait l'objet de différentes politiques sectorielles comme la première politique commune des pêches de 1983. Avec l'accélération bleue, c'est-à-dire la multiplication et l'intensification de l'utilisation des ressources et des espaces marins (Jouffray *et al.*, 2020) et la prise de conscience des impacts du développement économique sur la biodiversité, une meilleure prise en compte des conflits d'usages, des risques, des impacts cumulés et des synergies liées à ces activités s'avère nécessaire. Ainsi, en 2007, la Commission européenne publie un cadre d'actions pour sa politique maritime intégrée (PMI) visant la promotion de l'économie bleue tout en s'assurant de la durabilité de l'exploitation des mers et des océans. L'Europe s'est donc dotée de divers instruments (directives, communications, stratégies, feuilles de route, etc.) lui permettant de déployer son cadre d'actions. Parmi ceux-ci, deux directives clés illustrent les tensions entre les différentes dimensions de la durabilité : la directive-cadre Stratégie pour le Milieu Marin – DCSMM (2008/56/CE), imposant aux États membres d'atteindre le bon état écologique (BEE) de leurs eaux marines, et la directive-cadre pour la Planification de l'Espace Maritime – DCPEM (2014/89/UE) établissant un cadre pour l'organisation temporelle et spatiale des activités maritimes. L'analyse de la mise en œuvre de la DCPEM permet d'accéder aux visions de la durabi-

lité portées par les États membres européens quant au développement des activités maritimes (Brenann *et al.*, 2014). Nous proposons d'étudier ici les processus d'intégration des enjeux environnementaux, sociaux et économiques dans la planification de l'espace maritime (PEM) en France et les conditions de durabilité du développement des activités maritimes à travers l'exemple du déploiement de l'éolien en mer.

La déclinaison de la politique maritime intégrée en France

En France, les orientations nationales pour les politiques maritimes et littorales sont encadrées par la Stratégie Nationale Mer et Littorale (SNML) adoptée dans sa deuxième version pour la période 2024-2030. Elle permet la prise en compte des interactions entre des politiques publiques variées telles que la protection de l'environnement (politique sur les aires protégées, notamment la désignation des Zones de Protection Forte (ZPF) avec des objectifs surfaciques chiffrés par façade maritime¹, atteinte du BEE tel que défini par la DCSMM, mise en œuvre du règlement sur la restaura-

¹ 5 % des façades métropolitaines en ZPF d'ici 2030, avec des objectifs intermédiaires par façade à atteindre d'ici 2027 : 1 % de la façade Manche-Est - Mer du Nord ; 3 % de la façade Nord-Atlantique - Manche Ouest ; 3 % de la façade Sud-Atlantique ; 5 % de la façade Méditerranée.

Encadré 1 : Les principales évolutions réglementaires visant à accélérer le déploiement de l'éolien en mer

2016 : Nouvelle procédure AO - dialogue concurrentiel

- Mise en place d'un dialogue entre l'État et les candidats pour définir le cahier des charges de l'AO.
- Prise en charge par l'État des études dites de levées des risques.

2018 : Loi pour un État au service d'une société de confiance (ESSOC)

- Autorisations administratives à caractéristiques variables (« permis enveloppe ») : possibilité d'ajuster la puissance, le nombre et le gabarit des éoliennes pour tenir compte des dernières avancées technologiques.
- Débat public réalisé en amont de l'AO ; les contributions qui en résultent alimentent le dialogue concurrentiel. Évolution du contenu du débat public : sont désormais discutés l'opportunité, le choix de la localisation de la ou des zones préférentielles d'implantation des projets, les résultats des études techniques.

2020 : Loi d'accélération et simplification de l'action publique (ASAP)

- Réduction du délai de traitement des recours en donnant au Conseil d'État la compétence en premier et dernier ressort pour arbitrer les contentieux, à la place de la cour administrative d'appel de Nantes jusque-là compétente.
- Possibilité de passer d'un débat public par parc à un débat public portant sur plusieurs parcs sur une même façade maritime pour donner une visibilité plus importante au public.

2023 : Loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables (APER)

- Mutualisation des débats publics de l'éolien en mer et du débat public des DSF.

2025 : Loi portant diverses dispositions d'adaptation au droit de l'Union européenne (DDADUE) – transposition de la directive RED III

- Dans le cadre d'une demande de dérogation pour espèces protégées, suppression de la démonstration de la raison impérieuse d'intérêt public majeur (RIIMP) pour les projets d'installations de production d'énergies renouvelables.

tion de la nature...), l'appui à la recherche et à l'innovation maritime, la transition durable des activités maritimes ainsi que le développement de l'éolien en mer visant des objectifs chiffrés de production². Les objectifs nationaux de la SNML sont ensuite déclinés au niveau des façades maritimes *via* les Documents Stratégiques de Façade (DSF).

Ces documents revêtent une dimension stratégique au travers d'un premier volet dressant un état initial, des objectifs stratégiques adaptés au contexte de la façade concernée, ainsi qu'une priorisation spatiale des activités maritimes définie par une carte des vocations. Un volet opérationnel vient s'ajouter pour définir un plan d'action et un programme de suivi. La PMI en France se présente ainsi comme une continuité entre orientations stratégiques et mise en œuvre opérationnelle à travers une déclinaison d'actions et de priorités spatiales.

² Objectifs nationaux de 35 GW installés d'ici à 2035 et 45 GW d'ici à 2050. Déclinaison par façade d'ici à 2035 : 7 à 11 GW pour Manche Est - Mer du Nord ; 6 à 9,5 GW pour Nord Atlantique - Manche Ouest ; 2 à 5,5 GW pour Sud Atlantique ; 3 à 4,5 GW pour Méditerranée.

Cette démarche à l'échelle des façades se veut intégrée et traite de façon conjointe des problématiques environnementales et des enjeux socio-économiques des activités maritimes et littorales. Les DSF sont d'ailleurs les instruments de mise en œuvre combinée des directives DCPEM et DCSMM, constituant une approche originale au niveau européen (Banfi *et al.*, 2025).

La planification de l'éolien en mer : une approche sectorielle partiellement intégrée à la PEM

L'éolien en mer et les DSF ont fait l'objet de processus disjoints jusqu'à récemment. Le démarrage du déploiement de l'éolien en mer est en effet antérieur à la PEM. Sous l'impulsion du Grenelle de l'environnement (2007) des premiers objectifs de développement des énergies renouvelables sont fixés en 2009³. En 2009 et 2010, un premier exercice de planification identifie des zones

³ Arrêté du 15 décembre 2009 relatif à la programmation pluriannuelle des investissements de production d'électricité.

propices sur lesquelles portera le premier Appel d'Offres (AO1) pour l'implantation de parcs éoliens en mer. Cependant, la faible anticipation des contraintes ainsi que les nombreux recours sur les projets ont étendu les délais de mise en service de ces parcs, effective seulement en 2022 et 2023. Au regard de ces difficultés, une série d'évolutions, dont certaines réglementaires, ont été lancées par le gouvernement français pour accélérer les procédures d'autorisation, réduire les risques d'investissement et amplifier le rythme de lancement des appels d'offres (cf. Encadré 1).

2023 représente une année charnière où la planification de l'éolien en mer rencontre celle de l'espace maritime grâce à la loi APER⁴ qui permet d'intégrer dans la révision des DSF une cartographie des zones prioritaires pour le développement de l'éolien en mer à l'horizon 2050. Un déploiement de l'éolien en mer planifié sur le long terme succède ainsi à un processus décisionnel fondé sur une « planification » parc après parc. La loi APER permet par ailleurs la tenue d'un débat public mutualisé pour permettre aux citoyens de débattre de la révision des stratégies de façades et de la cartographie de l'éolien en mer. Ce débat public mutualisé, nommé « La mer en débat », s'est tenu entre 2023 et 2024. S'appuyant sur les concertations menées et le débat public, la cartographie de l'éolien en mer est adoptée par décision ministérielle en octobre 2024. La planification de l'éolien rencontre également celle de l'espace maritime à l'occasion du portage des objectifs de l'éolien en mer par la nouvelle SNML de 2023, dans l'attente de la parution de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 3, publiée tardivement en 2026.

Faisant l'objet d'une volonté politique forte, l'éolien en mer est ainsi venu bousculer la pratique française de la planification : le second cycle de la PEM a été particulièrement focalisé sur la spatialisation de cette activité. Néanmoins, même si ce n'était pas leur objectif premier, les évolutions du processus de planification de l'éolien en mer, tournées vers une sécurisation des investissements industriels, ont permis de progresser vers l'intégration du secteur dans la politique maritime intégrée.

Vers une meilleure intégration des enjeux environnementaux et socio-économiques liés à l'éolien en mer dans la planification de l'espace maritime ?

L'intégration de la planification éolienne au processus de la PEM est une opportunité pour une meilleure prise en compte des effets du développement de ce secteur sur l'environnement, en considérant les impacts cumulatifs issus des autres secteurs d'activité. Tout d'abord, la PEM, et donc la planification de l'éolien, est soumise à une unique Évaluation Environnementale Stratégique (EES), processus visant à réduire l'impact d'un plan

ou programme en estimant ses effets sur l'ensemble des composantes environnementales (la biodiversité, le climat, l'eau, l'air, le sol, le paysage, mais aussi la santé humaine et le patrimoine culturel) et en proposant des mesures d'évitement, de réduction ou de compensation de ces impacts (séquence ERC)⁵. Ainsi, l'évaluation des effets du déploiement des parcs éoliens est incluse dans l'évaluation globale des DSF, à l'échelle des façades maritimes comprenant plusieurs projets de parcs éoliens (contrairement à l'étude d'impact, également réglementaire mais conduite à l'échelle d'un parc isolé). Ceci évite également l'effet de loupe lié à l'évaluation indépendante de cette nouvelle activité en prenant en compte les rétroactions avec les autres activités, négatives (cumulation d'effets) ou positives (de par l'exclusion potentielle de certains usages impactants pour l'environnement dans les parcs éoliens). De plus, des moyens complémentaires ont été déployés pour la cartographie des enjeux environnementaux les plus sensibles aux pressions issues de l'éolien en mer (avifaune, mammifères marins, habitats benthiques), lesquels bénéficient au processus d'EES dans son ensemble. En intégrant la mise en œuvre de la DCSMM, les DSF permettent d'exploiter l'évaluation de l'état du milieu marin, réalisée à travers 11 descripteurs dont certains sont directement influencés par le déploiement de l'éolien en mer (état de la biodiversité, contaminants chimiques, bruit sous-marin...), pour éclairer la planification de ce secteur. Enfin, des actions adoptées au titre de la DCSMM visent à réduire les pressions exercées notamment par le secteur éolien, comme le renforcement de la prise en compte des habitats benthiques dans les demandes d'autorisation (via la réalisation de synthèses de connaissances et la production d'outils pour les services instructeurs).

D'autre part, le processus de planification comprend désormais la désignation des zones de protection forte, au regard des objectifs établis par la stratégie nationale pour les aires protégées et repris par la SNML (10 % des eaux strictement protégées à l'échelle nationale avec une déclinaison spécifique pour chaque façade métropolitaine). Cette approche intégrée promeut l'évitement des zones les plus sensibles pour la planification de l'éolien en mer à moyen et long terme. Concernant les interactions entre l'éolien en mer et les autres activités maritimes, l'approche intégrée encouragée par la SNML et les DSF permet de considérer les besoins sectoriels dans une démarche d'évitement des zones à enjeu pour les autres activités maritimes, ou dans une recherche de coexistence spatiale (l'accès de l'activité de pêche aux parcs éoliens est notamment encouragé). L'intégration de la planification éolienne dans une démarche globale multi-sectorielle à l'échelle des façades maritimes est un atout pour une planification prenant en compte l'ensemble des enjeux maritimes à une échelle spatiale permettant d'anticiper les effets du déploiement global de l'activité. Cependant, cette intégration reste partielle et nécessite encore des améliorations pour que cette approche soit totalement intégrée.

⁴ Loi n°2023-175 du 10 mars 2023 relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables.

⁵ Article L.122-6 du code de l'environnement.

Il est à noter que, si le débat public et les évaluations environnementales de la PEM et de la planification éolienne sont conjoints, les actes administratifs relatifs aux deux démarches restent dissociés (arrêté préfectoral pour les DSF, décision ministérielle pour la planification de l'éolien), ce qui entraîne des incohérences sur certaines façades maritimes, comme le chevauchement de la zone prioritaire pour le développement de l'éolien en Bretagne Nord-Ouest sur plusieurs zones de vocation du DSF Nord Atlantique Manche Ouest. D'autre part, la connaissance des effets des pressions issues du secteur éolien et des impacts cumulatifs résultants (à l'échelle d'un parc générant diverses pressions ou à l'échelle d'une façade cumulant des pressions issues de différents parcs) reste parcellaire et complique la réalisation de l'EES. On peut également noter les limites de l'exercice d'évaluation de l'état écologique qui n'apporte pas assez d'éléments spatialisés ni de cibles précises sur les niveaux de pressions soutenables pour éclairer correctement l'exercice de planification maritime, pour l'éolien comme pour les autres activités.

Vers des processus de gouvernance plus inclusifs ?

L'élaboration et la mise en œuvre des DSF s'appuient sur des instances consultatives *ad hoc*, les conseils maritimes de façade (CMF), regroupant les acteurs selon les 5 collèges du Grenelle de l'environnement (État, collectivités locales, entreprises, syndicats et associations). Les CMF permettent ainsi d'inclure les acteurs dans l'identification des principaux enjeux, de définir une vision pour l'avenir de la façade et de proposer des objectifs et des actions stratégiques.

Jusqu'à peu, la consultation des acteurs, notamment via les CMF, et du public était menée de façon dissociée, par l'organisation de débats spécifiques à chaque appel d'offres éolien ou à l'occasion de l'élaboration des différents volets des DSF, ce qui induisait un manque de lisibilité des processus, notamment pour les habitants des territoires littoraux qui suivaient les concertations continues propres à chaque parc éolien. Ce n'est qu'en 2023 qu'un premier débat public « La mer en débat », mutualisé entre planification éolienne et PEM, a été organisé. La consultation des citoyens à propos des projets individuels de parcs se poursuit néanmoins sans être parfaitement connectée aux processus de concertation des DSF. Le défaut de lisibilité des processus n'est que partiellement résolu.

Même si, en matière de portée de la consultation, de ressources mobilisées, de matériel produit ou d'existence d'organes ou de réseaux de gouvernance dédiés, la PEM a dû innover, son caractère « transformatif » vers un système plus durable doit cependant être confirmé. En effet, malgré un effort de production de connaissances scientifiques favorisée par l'application de la DCSMM, le manque d'opérationnalisation de la science produite en informations prêtes à l'emploi pour les parties prenantes et les décideurs constitue une limitation. Les démarches d'engagement des acteurs sont généralement restreintes à la phase d'information

et de consultation (voir la Figure 1). En effet, les processus de co-production de connaissances nécessitent la mise en place de mécanismes adaptés garantissant un processus bidirectionnel dans l'élaboration des visions de la PEM, s'appuyant sur des processus de renforcement des capacités des acteurs (Jacob *et al.*, 2023).



Figure 1 : Les différents degrés de la participation (Source : CEREMA, La boussole de la participation, <https://boussole-participation.cerema.fr/echelle-arnstein>, consulté le 18/05/2026).

Conclusion

Après avoir été longtemps mené en parallèle, le déploiement de l'éolien en mer a été récemment intégré dans la PEM dans l'objectif de croiser les enjeux de développement à long terme de ce secteur avec ceux des activités maritimes existantes, tout en tenant compte des enjeux environnementaux. Les défis relatifs à cette intégration restent malgré tout encore nombreux pour s'assurer que cette activité émergente de l'économie bleue s'inscrive dans des conditions de durabilité environnementale et sociale suffisantes.

Bibliographie

- BANFI P., PAZOS A., ZAMPARUTTI T. & ALONSO I. (2025), "Study on the implementation by EU Member States of Directive 2014/89/EU on Maritime Spatial Planning", Publications Office of the European Union, doi:10.2926/3559392
- BRENNAN J., FITZSIMMONS C., GRAY T. & RAGGATT L. (2014), "EU marine strategy framework directive (MSFD) and marine spatial planning (MSP): Which is the more dominant and practicable contributor to maritime policy in the UK?", *Marine Policy*, 43, pp. 359-366.
- JACOB C., DIEDERICHSEN S. D., FULLBROOK L., LOMBARD A. T., REES S. E., RIVERS N. NINER H. J. *et al.* (2023), "A two way process—Social capacity as a driver and outcome of equitable marine spatial planning", *Marine Policy*, 149, 105507.
- JOUFFRAY J. B., BLASIAK R., NORSTRÖM A. V., ÖSTERBLOM H. & NYSTRÖM M. (2020), "The blue acceleration: the trajectory of human expansion into the ocean", *One earth*, 2(1), pp. 43-54.

La décarbonation du transport maritime : le défi de la décennie pour un géant des mers

Par Pierre MARTY

Maître de conférences à l'École Centrale de Nantes

Maximilien SIMON

Adjoint au Directeur de la flotte océanographique à l'Ifremer

& Lucas LEON

Ingénieur naval au sein de l'unité « navires et systèmes embarqués » à l'Ifremer

Le transport maritime, c'est l'artère vitale de notre économie globalisée, convoyant 80 % des biens que nous consommons d'un bout à l'autre du monde. Incroyablement efficace et étonnamment abordable, il n'en est pas moins un poids lourd dans la balance des émissions de CO₂ et un acteur clé de diverses pollutions. Le transport maritime est pourtant à un tournant historique, sa décarbonation n'est plus une option, mais une nécessité.

Cet article plonge au cœur des enjeux environnementaux, des solutions technologiques communes : nouveaux carburants, propulsion vélique, et des obstacles économiques qui balisent la route vers la décarbonation du secteur maritime. Il est nécessaire d'agir vite et fort dès à présent pour respecter les engagements climatiques d'ici à 2050. Un cas d'étude consacré à la décarbonation de la flotte océanographique française illustre les défis et les opportunités à saisir.

Introduction

Le transport maritime est le cœur battant de notre monde interconnecté. Des jouets importés de Chine à votre table, aux minerais essentiels à notre industrie, 80 % des marchandises échangées entre nations empruntent les routes maritimes. Une prouesse logistique d'une efficacité énergétique redoutable, permettant de déplacer des volumes colossaux à des coûts défiant toute concurrence. Un porte-conteneurs géant, capable d'acheminer l'équivalent de 24 000 conteneurs, consomme autant de carburant que 1 600 Twingo essence. Ce qui fait une Twingo pour 15 conteneurs ! C'est dire l'efficacité énergétique du transport maritime mondial. Pourtant, sous cette façade se cache une réalité plus sombre : une empreinte environnementale complexe et un défi de décarbonation qui prend des allures de course contre la montre.

Les émissions de CO₂ des navires au niveau mondial approchent le milliard de tonnes de CO₂ émis chaque année et cette quantité continue d'augmenter chaque année (OECD, 2026). Le transport de marchandises (*containers, tankers, cargo...*) représente la grande majorité, soit environ 900 millions de tonnes de CO₂ par an (voir la Figure 1).

Quand les géants des mers laissent leur marque

Nos océans, nos littoraux, et même notre atmosphère portent les stigmates d'une activité maritime intense. Si l'on pense souvent aux marées noires, celles-ci sont, heureusement, en net recul grâce aux innovations comme les doubles coques. Mais le tableau est bien plus nuancé.

L'air que nous respirons, notamment près des ports, subit les assauts des émissions. La combustion des fiouls lourds, ces résidus goudronneux du raffinage du pétrole qui propulsent la majorité des navires, libère des oxydes de soufre (SO_x), d'azote (NO_x) et des particules fines. Des polluants qui sapent notre santé, favorisent les pluies acides, et dont la réduction, bien que réelle grâce aux normes internationales (OMI), reste une bataille de chaque instant. Le paradoxe est même parfois saisissant : réduire les émissions de soufre pour purifier l'air peut, temporairement, accélérer le réchauffement climatique, car ces polluants avaient un effet « masquant » en réfléchissant la lumière du soleil.

L'eau n'est pas épargnée. Les eaux de lavage des fumées, censées nettoyer l'air, finissent parfois par contaminer les océans. Les « dégazages » intempêtes continuent d'exister. Et puis, il y a ces envahis-

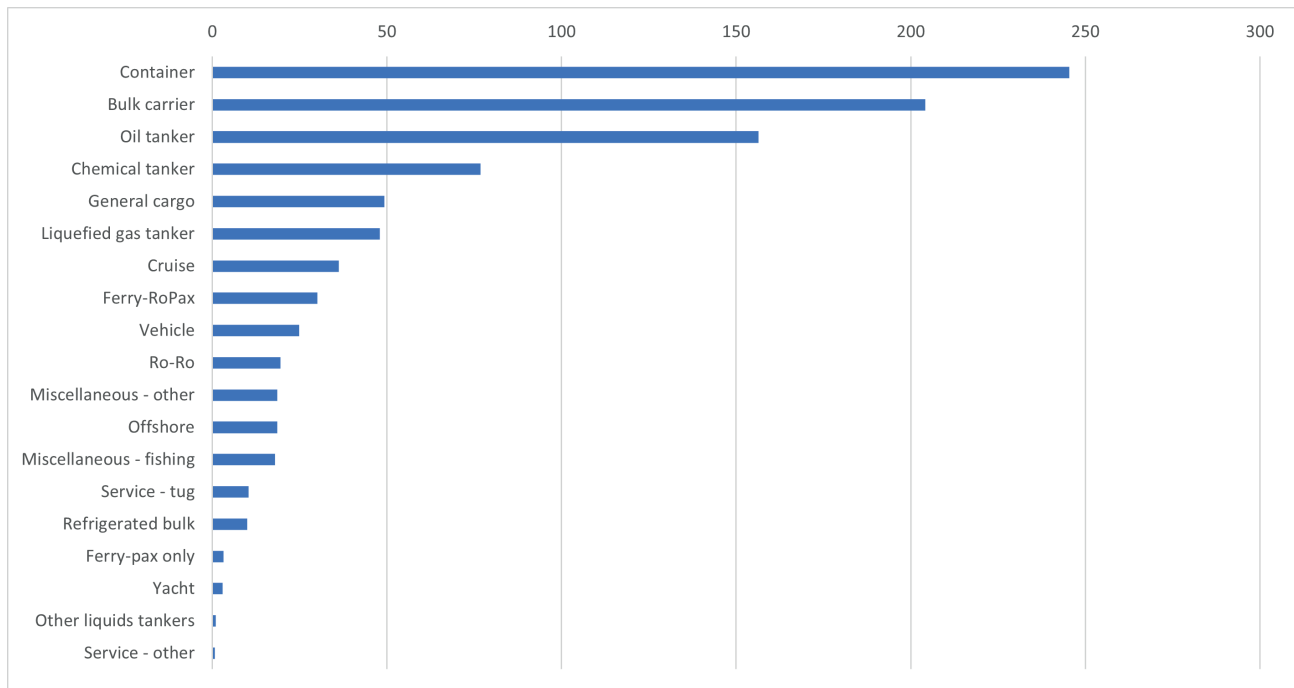


Figure 1 : Répartition mondiale des émissions de CO₂ du secteur maritime par type de navire pour l'année 2024 en millions de tonnes (Source : d'après l'OCDE).

seurs silencieux : des espèces marines transportées clandestinement dans les eaux de ballast des navires, menaçant l'équilibre fragile de nos écosystèmes. Sans oublier la pollution sonore sous-marine, qui désoriente les animaux marins, ou le risque de collisions avec des géants des mers comme les baleines.

Et bien sûr, le mastodonte : le changement climatique. Le transport maritime, avec ses 2 à 3 % des émissions mondiales de CO₂ fossile, est un acteur de poids. Certes, moins que le transport routier, mais la tendance est à la hausse, avec une augmentation de près de 20 % des émissions au cours de la dernière décennie. La dépendance quasi-totale du secteur aux énergies fossiles (99,9 %) fait de sa décarbonation un défi de taille.

Cap sur la décarbonation : une feuille de route aux multiples escales

Face à cette urgence, le secteur maritime ne manque pas de pistes. C'est un éventail de solutions qui s'esquisse, allant de l'optimisation la plus simple aux innovations les plus audacieuses.

D'abord, la sobriété et l'efficacité énergétique. Avant même de songer à changer de carburant, l'industrie peut déjà réduire massivement son impact. Le levier le plus puissant ? La vitesse. Ralentir de 20 % peut faire chuter la consommation de carburant de 40 %. Bien sûr, cela rallonge la durée des trajets et pourrait nécessiter davantage de navires à terme, mais les bénéfices environnementaux immédiats sont indéniables. L'optimisation, c'est aussi le « juste-à-temps » pour les arrivées portuaires, ou le « Waze des mers » qui guide les navires pour éviter tempêtes et courants contraires. Sans oublier des améliorations techniques sur les

navires eux-mêmes : des coques plus glissantes, des hélices perfectionnées, une meilleure hydrodynamique et aérodynamique, et même la tendance à construire des bateaux plus grands pour une meilleure efficacité par tonne transportée.

Et puis, il y a ce retour aux sources, teinté de modernité : la propulsion assistée par le vent. Loin des trois-mâts de légende, on parle aujourd'hui de voiles rigides, de rotors Flettner, ou d'ailes de cerf-volant qui viennent en renfort des moteurs. Une assistance « vélique » qui, pour l'heure, en est encore à ses balbutiements, mais dont les premiers tests sont extrêmement prometteurs (NEW¹, Canopée², Orient Express³, Neoliner⁴...), avec des réductions de consommation allant jusqu'à 40 % sur certains navires.

Mais pour une décarbonation en profondeur, il faudra bien sûr dire adieu au pétrole. Et là, le menu des alternatives est riche et varié. Pour les trajets courts, l'électrification *via* batteries est déjà une réalité, notamment pour les *ferries*. Imaginez : le plus grand *ferry* électrique en construction pourra transporter plus de 2 000 passagers sur 200 km ! Une solution propre, silencieuse, mais limitée par le poids et le volume des batteries. Le nucléaire, bien que techniquement possible, se heurte à d'énormes obstacles de sécurité, de coût initial et, surtout, d'acceptabilité politique et sociale. Un navire nucléaire serait aujourd'hui un paria dans de nombreux ports mondiaux.

¹ <https://www.meretmarine.com/fr/marine-marchande/towt-repris-par-le-credit-mutuel-37-emplois-conserves-et-recentrage-sur-la-ligne-vers-le-bresil>

² [https://fr.wikipedia.org/wiki/Canop%C3%A9e_\(cargo\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Canop%C3%A9e_(cargo))

³ [https://fr.wikipedia.org/wiki/Orient_Express_Corinthian_\(paquebot\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orient_Express_Corinthian_(paquebot))

⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Neoliner_Origin

Encadré : Le cas des navires océanographiques

Les navires océanographiques appartiennent à la grande famille des navires « de service » ou « offshore ». Ils contribuent faiblement aux émissions globales, mais ils présentent un caractère particulier, car ils sont entièrement dédiés à embarquer des scientifiques, des engins d'exploration et des capteurs pour comprendre l'océan et le climat planétaire. Il existe bien un paradoxe : ces navires qui ramènent des données indispensables pour comprendre le changement climatique n'échappent pas à l'utilisation d'énergies fossiles. L'Ifremer opère la Flotte océanographique française (FOF) qui est accessible à l'ensemble de la communauté scientifique nationale des sciences de la mer. C'est un ensemble de 17 navires océanographiques et d'engins sous-marins parmi les plus remarquables et performants au monde. Une stratégie de décarbonation de cette flotte a été élaborée en 2024 (Simon *et al.*, 2025) et commence à être mise en place.

La décarbonation des navires océanographiques est un problème éthique et économique. Économique, car en cas de nouvelles tensions sur le prix du baril, les flottes océanographiques ne seront plus capables de maintenir leur activité ce qui priverait la recherche d'une capacité à accéder à l'océan. Éthique, puisque les laboratoires de recherche qui utilisent régulièrement les moyens de la FOF présentent aujourd'hui un bilan carbone annuel de l'ordre de 20 t. de CO₂ émis par personne et par an. La moitié des 60 000 teCO₂ émises par un établissement tel que l'Ifremer est liée aux navires océanographiques. Dès lors, au même titre que d'autres recherches qui utilisent des moyens lourds – astronomie, physique des particules – l'impact environnemental de la recherche en sciences marines ne peut plus être ignoré. En 2022, le Comité d'éthique du CNRS soulignait que l'impact environnemental de la recherche est devenu un enjeu éthique au même titre, par exemple, que l'expérimentation animale ou la protection des personnes (Leclerc *et al.*, 2022).

Les navires océanographiques présentent des spécificités dans leur conception et leur utilisation : ils n'opèrent pas de trajets réguliers sur des routes établies, alternent des périodes de transits, d'opérations en mer et d'attentes à quai ; réalisent des déploiements d'engins et d'acquisition de données variées. Un navire hauturier tel que le *Pourquoi Pas ?* émet annuellement environ 7 500 teCO₂, alors qu'un navire côtier tel que le *Côtes de la Manche* en émet environ 400 teCO₂.

Les solutions de décarbonation pour la FOF sont de natures complémentaires : (i) une évolution des usages des navires et une recherche de sobriété, (ii) des évolutions technologiques. Pour la sobriété, l'un des premiers leviers à mobiliser serait de ralentir la vitesse des navires en transit. Cependant, ce principe se heurte à des contraintes opérationnelles telles que le maintien d'un équipage pendant plus de 40 jours en mer, ou des contraintes économiques, car le coût des campagnes augmente directement avec la durée puisque l'économie réalisée sur le carburant ne compense pas les coûts de personnel. L'autre aspect de la sobriété est de faire évoluer les protocoles scientifiques pour les adapter à des supports en mer plus sobres : voiliers, drones. Ces évolutions peuvent être réalisées par certaines disciplines scientifiques, mais ne sont pas envisageables pour la paléoclimatologie ou l'étude des grands fonds, qui requiert des moyens lourds (carottage, engins sous-marins).



Figure a : Concept de navire océanographique hauturier hybride vélique (Crédits photo : KHMD - Ship ST).

Les évolutions technologiques sont l'autre pan de la décarbonation des navires océanographiques. La propulsion hybride avec assistance vélique semble être une voie prometteuse pour décarboner les navires océanographiques hauturiers qui sont sujets à de longs transits (35 % de la consommation de carburant de ces navires est réalisée en transit). Pour la FOF, le nécessaire renouvellement de 3 navires hauturiers entre 2030 et 2035 pourrait être une opportunité de faire entrer en service des navires hybrides véliques. L'utilisation du courant électrique lorsque les navires sont à quai est l'une des mesures les plus immédiates et efficaces à court terme (12 % de la consommation de carburant de la FOF est réalisée à quai). Enfin, la diversification des carburants vers des biocarburants, méthanol ou autres électro-carburants est une piste, cependant le coût élevé ou l'incertitude sur la disponibilité de ces carburants conduisent aujourd'hui à privilégier d'autres leviers.

Une estimation des trajectoires de décarbonation possibles de 2025 à 2050 a été réalisée. Deux scénarios types ont été choisis puis la trajectoire de décarbonation de chaque scénario a été calculée. Le scénario (S1) est basé sur l'utilisation des biocarburants puis l'utilisation massive d'e-carburants, faiblement émissifs de GES. L'autre (S2) s'appuie essentiellement sur des navires hauturiers à propulsion hybride vélique. Ces scénarios reposent sur un socle commun de mesures de décarbonation entre 2025 et 2031, notamment l'utilisation du courant de quai.

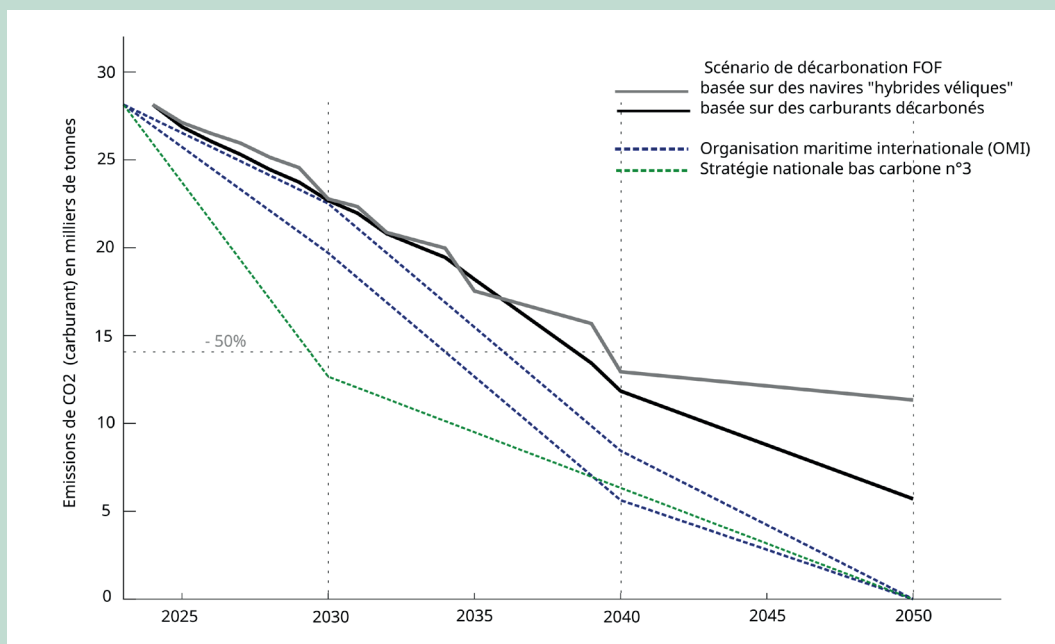


Figure b : Deux scénarios de décarbonation de la FOF : S1 repose sur l'utilisation massive d'e-carburants, S2 repose sur des navires hauturiers hybrides utilisant le vent lors des transits (Source : Ifremer).

Les deux scénarios conduisent à des niveaux de décarbonation équivalents, c'est-à-dire une réduction de moitié des émissions de GES à l'horizon 2040 (voir la Figure b). Pour l'entrée en flotte progressive de navires hauturiers à propulsion hybride vélique (S2), nous avons testé l'hypothèse selon laquelle 50 % de l'énergie propulsive durant les transits provient du vent. Cette hypothèse, raisonnable au regard des premières performances enregistrées par les systèmes véliques, amène à un niveau de décarbonation comparable avec le scénario S1 qui repose sur une hypothèse incertaine de développement industriel des e-carburants.

Dès lors, sans exclure totalement l'usage de carburants alternatifs à l'avenir, il est essentiel pour la FOF d'engager rapidement une réflexion sur la conception de navires océanographiques hauturiers à propulsion mixte électrique-vélique.

Il faut mesurer l'ampleur du défi auquel est confronté la flotte océanographique. Le maintien des capacités océanographiques françaises associées à l'atteinte des objectifs de décarbonation passera par des budgets d'investissement historiquement inédits. En 2026, la FOF a commencé à mettre en œuvre un plan de transformation ambitieux intégrant l'expérimentation de campagnes océanographiques à la voile, l'adaptation des navires au courant de quai, et la mise à l'étude d'un navire océanographique hauturier hybride vélique en remplacement de l'Atalante.

Pour les longues distances, les projecteurs se tournent vers les « électro-carburants » : principalement l'ammoniac et le méthanol. Produit à partir d'électricité bas carbone et d'hydrogène, l'ammoniac est sans carbone, mais sa toxicité et le besoin colossal d'électricité pour sa production (l'équivalent d'un cinquième de la production électrique mondiale actuelle pour remplacer tout le fioul maritime !) en font un défi de taille. Le méthanol, plus mature technologiquement et plus facile à manipuler car moins toxique, requiert lui aussi beaucoup d'électricité, mais aussi du carbone, ce qui pose la question de son origine (fossile, biomasse ou capture directe dans l'air).

Les biocarburants sont également sur la table. Ceux de première génération, issus de cultures, peuvent être utilisés facilement, mais leur empreinte foncière est gigantesque, menaçant forêts et sécurité alimentaire. Utiliser des terres arables pour des carburants alors que des solutions électriques existent pour d'autres transports relève de l'aberration écologique. Les biocarburants de seconde génération, issus de déchets ou de résidus, sont plus vertueux mais leur gisement est limité et la fraude un risque réel. Enfin, le GNL (gaz naturel liquéfié) est une solution de transition, moins polluante que le fioul, mais qui maintient une dépendance aux énergies fossiles et dont les fuites de méthane (un puissant GES⁵) peuvent annuler les gains climatiques.

Dernière piste, plus marginale : la capture de carbone à bord des navires. Un défi technique colossal, encore plus complexe qu'à terre, et qui ne résout pas la dépendance aux fossiles.

Un horizon semé d'embûches, mais plein d'opportunités

L'addition de tous ces efforts aura un coût. Les carburants alternatifs sont chers, beaucoup plus que le fioul. Multiplier par trois le prix du carburant peut doubler les coûts d'exploitation d'un navire. Mais le vrai choc pour le consommateur ? Moins spectaculaire qu'il n'y paraît. Quelques centimes sur une paire de chaussures, quelques euros sur un téléviseur. L'impact sur les prix des biens manufacturés sera modeste, ce qui est une excellente nouvelle pour maintenir la pression sur la décarbonation du secteur. Pour les matières premières à bas coût (sable, graviers, charbon, céréales), l'impact sera plus notable, pouvant même encourager une relocalisation parfois salutaire lorsqu'elle est possible.

La course à la décarbonation est aussi une course contre le temps. La durée de vie des navires est longue (25 à 30 ans⁶), ce qui confère une inertie considérable à la flotte mondiale. Les réglementations internationales, notamment celles de l'OMI et de l'Union européenne, se durcissent pour contraindre le secteur à innover. L'objectif de neutralité carbone en 2050 implique que la

majorité des navires construits aujourd'hui doivent être conçus pour utiliser des énergies bas carbone.

Face à un tel défi, l'innovation et la recherche scientifique jouent un rôle absolument essentiel. Des laboratoires œuvrent sur tous les fronts : électrification, piles à combustible, biocarburants, assistance vélique. Leur mission est de lever les verrous technologiques, d'optimiser les solutions existantes et d'éclairer les décideurs politiques. Dans cette trajectoire, le programme France 2030 a soutenu trois projets⁷ rendus publics en février 2026 : traction par kite, optimisation opérationnelle de la conduite des navires, plateforme de routage.

En somme, le transport maritime est à un tournant historique. Sa décarbonation n'est pas une option, mais une nécessité. La diversité des navires et des trajets rendra sans doute le mix énergétique complexe et multifacette. Mais une chose est sûre : l'efficacité intrinsèque du transport maritime, combinée à une volonté politique affirmée et à une innovation constante, permettra à ce géant des mers de poursuivre son chemin, mais cette fois-ci, sur des flots plus verts.

Bibliographie

LECLERC O., GUILYARDI É., THIEBAULT S. *et al.* (2022), « Intégrer les enjeux environnementaux à la conduite de la recherche, une responsabilité éthique », Avis 2022-43, Comité d'éthique du CNRS.

OECD (2026), "Maritime transport CO₂ emissions", Consulté le 14 avril 2026, <https://www.oecd.org/en/data/datasets/maritime-transport-co2-emissions.html>

MAXIMILIEN S. (Coord.), LEFORT O., DAVID-BEAUSIRE C. *et al.* (2025), « À quoi ressemblera demain la flotte océanographique française ? », 11 juin 2025, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00956/106798/>

⁵ Le méthane possède un potentiel de réchauffement global (PRG) de 28 sur 100 ans selon le rapport du GIEC : sur cet horizon de temps il est 28 fois plus puissant que le CO₂ pour piéger la chaleur dans l'atmosphère.

⁶ <https://8d073164.delivery.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/12/cuadro-flota.png>

⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/presse/france-2030-trois-premiers-projets-soutenus-accelerer-decarbonation-du-transport-maritime>

Santé unique et océan : une approche intégrée indispensable

Par Wilfried SANCHEZ

Responsable du thème transversal « Conjugons un océan sain et nourricier », Ifremer

Romane LUCQ

Chargée de mission sciences océaniques - politique, Ifremer

& Tristan RENAULT

Chargé de mission auprès de la direction générale concernant les sujets alimentation, santé animale et santé unique, Ifremer

L'intégration de l'océan dans l'approche "One Health" constitue aujourd'hui un enjeu stratégique pour éclairer la décision publique et accompagner les transitions. Pourtant, les politiques publiques, les dispositifs d'observation et les financements restent largement fragmentés entre les secteurs sanitaire, environnemental, alimentaire, énergétique et maritime. Il en résulte une difficulté à appréhender des risques pourtant interdépendants, en particulier dans un contexte de changement global.

Plusieurs défis déterminants doivent être relevés. Ils concernent l'intégration de données encore dispersées, le développement d'approches interdisciplinaires ou la mise en place de cadres de gouvernance capables de relier santé humaine, biodiversité, activités économiques et fonctionnement des socio-écosystèmes marins. Pour cela, l'investissement dans l'observation et les infrastructures de données, mais aussi la mobilisation des collectivités, des acteurs économiques et de la société civile, sont indispensables.

L'océan, pilier négligé de la santé unique

"One Health", "Planetary Health" ou bien encore "EcoHealth" sont autant de cadres conceptuels disponibles aujourd'hui qui visent à élargir les débats au-delà des santés humaine, animale et végétale, afin d'y inclure la santé des écosystèmes. Pour autant, l'océan y demeure encore insuffisamment intégré (Koesling *et al.*, 2025 ; Lucq, 2026).

À titre d'exemple, en juin 2025, alors que la France accueillait, à Nice, la Troisième Conférence des Nations unies sur l'Océan (UNOC3), le comité scientifique international du One Ocean Science Congress (OOSC) formulait un ensemble de recommandations à destination des chefs d'État et de gouvernement afin de permettre une prise d'engagements diplomatiques et politiques éclairés par les dernières connaissances scientifiques disponibles lors de l'UNOC3. L'une des recommandations visait à promouvoir une stratégie "One Health" (« Une seule santé ») cohérente qui favorise la collaboration entre les secteurs de l'environnement et de la santé afin de stimuler les innovations médicales et de réduire les risques de maladies et de pollution liés à l'exploitation de la biodiversité marine. Si

aucun engagement pris lors de l'UNOC3 n'a fait écho à cette recommandation (Sanchez *et al.*, 2026), il n'en demeure pas moins que l'approche de santé unique, dite "One Health", apparaît comme une démarche pertinente pour aborder les problématiques de préservation et de restauration des écosystèmes marins et des services qu'ils rendent aux sociétés humaines.

Fondée sur le constat de l'interdépendance étroite entre la santé humaine, la santé animale, la santé des végétaux et celle des écosystèmes, l'approche One Health s'est progressivement imposée comme un cadre de référence pour penser conjointement les enjeux sanitaires, environnementaux et sociétaux (voir la Figure 1). Définie au niveau international par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), l'Organisation mondiale de la santé animale (OMSA), l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE)¹, elle vise à dépasser les approches sec-

¹ Déclaration conjointe du Groupe tripartite (FAO, OIE, OMS) et du PNUE, le Groupe tripartite et le PNUE valident la définition du principe « Une seule santé » formulée par l'OHHLEP, <https://www.who.int/fr/news/item/01-12-2021-tripartite-and-unep-support-ohhlep-s-definition-of-one-health>

torielles traditionnelles afin de promouvoir une vision intégrée des risques et des solutions.

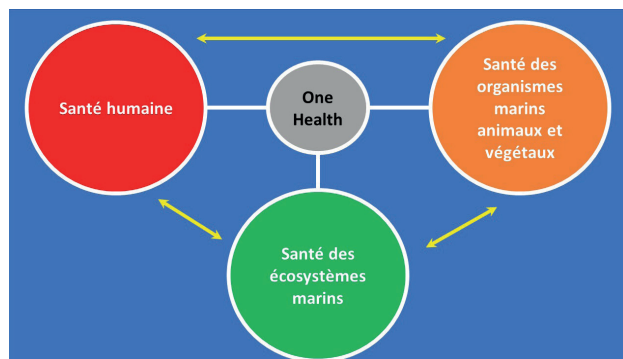


Figure 1 : Représentation schématique du concept One Health appliqué à l'océan (Source : Wilfried Sanchez).

Si cette approche s'est d'abord développée autour des interfaces entre santé humaine et santé animale dans les systèmes terrestres, la place de l'océan apparaît aujourd'hui comme un enjeu central de son approfondissement et de son opérationnalisation. L'océan couvre plus de 70 % de la surface du globe, régule le climat mondial, et constitue également un espace de biodiversité exceptionnelle, support d'activités économiques majeures et acteur de la sécurité alimentaire pour plusieurs milliards de personnes. Les services écosystémiques qu'il fournit contribuent ainsi de manière déterminante au bien-être humain ainsi qu'à l'économie mondiale.

Pourtant, les socio-écosystèmes marins demeurent encore insuffisamment intégrés dans les déclinaisons opérationnelles du concept One Health, alors même qu'ils concentrent des interactions particulièrement fortes entre pressions environnementales, dynamiques biologiques et usages humains. L'océan constitue en effet un espace d'interdépendances où convergent déchets, contaminants chimiques, agents pathogènes ou encore nutriments issus des activités continentales. Les continuités physiques propres aux milieux marins favorisent la circulation et la dispersion à grande échelle de ces pressions, transformant l'océan en réceptacle et en vecteur d'exposition/réexposition pour les sociétés humaines, notamment par l'alimentation.

Océan, santé et économie : des liens indissociables

L'océan est au cœur d'interactions complexes entre santé humaine, santé des écosystèmes et activités économiques. Ces interdépendances, longtemps appréhendées de manière sectorielle, apparaissent aujourd'hui comme profondément systémiques.

La santé humaine dépend directement du bon état des milieux marins. Les produits de la mer constituent une source essentielle de protéines, de lipides et de micronutriments. En effet, alors que la consommation de produits de la mer a doublé au cours des cinquante

dernières années, l'alimentation issue de l'océan représente 20 % des apports en protéines pour plus de 3 milliards de personnes (FAO, 2024). Mais l'océan est également un réservoir de molécules d'intérêt, avec environ 1 500 nouvelles molécules découvertes chaque année et susceptibles d'être le support de différentes applications, notamment dans le domaine médical ou cosmétique (Blasiak *et al.*, 2018). Cette fonction productive repose cependant sur la capacité des écosystèmes marins à maintenir leurs équilibres biologiques et leur qualité sanitaire. Or, les nombreuses pressions issues des activités humaines peuvent altérer les organismes marins, perturber les réseaux trophiques et exposer les populations humaines à des contaminants d'origine chimique ou microbiologique, tout particulièrement *via* l'alimentation ou les usages récréatifs du littoral (Landrigan *et al.*, 2020).

Le changement climatique, dont l'une des manifestations est le doublement des épisodes de canicules marines entre 1982 et 2016 (Frölicher *et al.*, 2018), amplifie ces dynamiques. Le réchauffement, l'acidification et la désoxygénation des océans modifient les habitats, déplacent les espèces et favorisent certaines proliférations toxiques ou certains agents pathogènes. Des risques autrefois localisés connaissent une expansion géographique et deviennent moins prévisibles. Comme mentionné dans l'article de Guillaume Mitta et de ses collaborateurs, c'est par exemple le cas de la ciguatera, une maladie causée par la consommation de poissons contaminés par des ciguatoxines produites par des microalgues du genre *Gambierdiscus*, qui est en expansion au-delà de la zone intertropicale où elle était initialement retrouvée. Dans les milieux marins, les enjeux sanitaires ne peuvent donc plus être dissociés des transformations environnementales globales.

Ces évolutions ont également une dimension économique majeure. L'océan soutient des secteurs stratégiques tels que la pêche, l'aquaculture, le transport maritime, ou encore le tourisme et les énergies marines renouvelables – qui dépendent directement du bon fonctionnement des écosystèmes. La dégradation des habitats côtiers, la baisse de biodiversité ou la multiplication des événements extrêmes fragilisent progressivement ces activités et les territoires qui en dépendent. À l'inverse, la préservation des écosystèmes marins constitue un investissement dans la résilience économique et sociale.

Défis pour une approche de santé unique appliquée à l'océan

Malgré la pertinence du cadre One Health, sa mise en œuvre opérationnelle demeure encore limitée dans les espaces marins. Parmi les obstacles figurent la fragmentation persistante des politiques publiques, des dispositifs d'observation et des mécanismes de financement, mais également la difficulté de définir ce qu'est la « bonne santé » d'un écosystème, notamment marin.

Les enjeux liés à la santé, à l'environnement, à l'alimentation, à l'énergie, au climat ou au maritime restent

majoritairement traités dans des cadres sectoriels distincts. Cette organisation limite la capacité à appréhender des risques pourtant interdépendants. Les milieux marins se situent à l'interface de nombreuses politiques publiques sans relever pleinement d'aucune d'entre elles, ce qui freine l'émergence d'approches coordonnées.

Cette fragmentation concerne également les données. Les systèmes d'observation de l'océan ont fortement progressé ces dernières décennies, notamment pour les paramètres physiques et chimiques. En revanche, les données biologiques et écologiques demeurent plus hétérogènes et insuffisamment connectées aux données sanitaires ou socio-économiques. Or, l'approche One Health suppose précisément la capacité à relier des informations issues de disciplines différentes afin de mieux comprendre les interactions entre biodiversité, agents pathogènes, contaminants chimiques et physiques, activités humaines et santé publique.

Au-delà des données elles-mêmes, c'est la capacité collective à développer une véritable interdisciplinarité qui constitue un enjeu central, en lien avec la nécessité de définir la notion d'océan en bonne santé, le terme « santé » étant souvent associé à une connotation de « bien-être » (Franke *et al.*, 2020). Certains auteurs, tels que Lidström *et al.* (2022), préfèrent même parler de l'océan que nous souhaitons plutôt que de se concentrer sur la santé de l'océan. Dans les deux cas, les approches One Health nécessitent de croiser écologie, océanographie, chimie, microbiologie, épidémiologie, économie ou encore sciences sociales. L'article d'Arnaud Huvet et de ses collaborateurs concernant la pollution plastique illustre pleinement le besoin d'interdisciplinarité afin d'aborder les différentes facettes de cette pollution globale. Cette intégration reste difficile dans des systèmes de recherche et de gouvernance encore largement structurés par disciplines et secteurs.

Enfin, les financements demeurent souvent cloisonnés et insuffisamment adaptés à des démarches transversales de long terme. Le développement d'approches intégrées nécessite pourtant des investissements durables dans l'observation, les infrastructures de données, la modélisation, la formation et les interfaces entre science et décision publique.

Pistes d'action pour une gouvernance One Health de l'océan

Face à ces défis, plusieurs leviers apparaissent déterminants pour rendre opérationnelle une approche One Health appliquée à l'océan.

Le premier consiste à renforcer l'intégration institutionnelle des enjeux marins dans les stratégies nationales et internationales One Health. L'océan ne peut plus être considéré comme un simple compartiment environnemental, mais comme un espace structurant des dynamiques sanitaires, climatiques et économiques. Cela suppose une meilleure articulation entre politiques de

santé, d'environnement, d'alimentation et de gouvernance des espaces et activités maritimes. L'annonce par le président de la République, lors du One Health Summit qui s'est tenu à Lyon en avril 2026, d'une révision de plusieurs politiques publiques, dont le Plan national santé environnement (PNSE), offre une réelle opportunité pour atteindre cet objectif.

Le deuxième levier concerne la science et les infrastructures de connaissance. Le développement d'une observation intégrée de l'océan, associant données physiques, chimiques, biologiques et sanitaires, constitue une condition essentielle d'anticipation des dangers. Les progrès récents dans le domaine du séquençage, de l'intelligence artificielle, de l'imagerie ou des jumeaux numériques ouvrent des perspectives importantes pour mieux comprendre mais aussi prévoir les trajectoires des socio-écosystèmes marins et ainsi éclairer les décisions publiques. L'article proposé par Yannick Gueguen et ses collaborateurs dans ce même numéro explore plus particulièrement ce sujet et souligne l'importance des approches d'observation intégrée pour préserver les écosystèmes mais aussi pour accompagner la transition des filières économiques liées à l'océan.

Le troisième levier repose sur la mobilisation des acteurs économiques et territoriaux. Les entreprises maritimes, les collectivités littorales et les filières alimentaires sont directement exposées aux conséquences des déséquilibres écologiques. L'article de Soizick Le Guyader et de ses collaborateurs permet une meilleure compréhension de ces interactions autour de la contamination microbiologique des ressources conchylicoles. Dans ce domaine, la récente feuille de route interministérielle pour l'amélioration de la qualité des eaux littorales souligne la nécessité d'une action coordonnée entre politiques de santé, d'assainissement, de biodiversité, d'urbanisme et de gestion des ressources marines. Elle met notamment l'accent sur l'identification de secteurs prioritaires, la diffusion de bonnes pratiques à l'ensemble des littoraux, incluant notamment des dispositifs d'alerte précoce expérimentés par les ostréiculteurs, ainsi que sur le renforcement des connaissances et de l'information du public. L'intégration des enjeux One Health dans les stratégies d'investissement, d'aménagement et de gestion des ressources devient un facteur croissant de résilience et de compétitivité.

Enfin, le développement d'une culture commune One Health apparaît indispensable. Cela implique de renforcer les formations interdisciplinaires, de favoriser les interfaces entre science et décision publique et de sensibiliser l'ensemble des parties prenantes aux interdépendances entre santé humaine, biodiversité et fonctionnement des écosystèmes marins.

Appel à l'action

L'approche One Health offre aujourd'hui un cadre particulièrement pertinent pour penser les interactions entre santé, environnement, biodiversité et développement économique. Pourtant, sa mise en œuvre restera incomplète tant que l'océan demeurera insuffisamment intégré aux stratégies de santé globale.

Dans un contexte d'accélération du changement climatique, d'érosion de la biodiversité et de multiplication des risques systémiques, préserver la santé des écosystèmes marins ne relève plus uniquement d'un objectif environnemental. Il s'agit d'un enjeu stratégique pour la sécurité alimentaire, la stabilité économique, la résilience des territoires et la santé des populations.

Le passage à l'action suppose désormais de dépasser les approches sectorielles afin de construire une gouvernance véritablement intégrée des socio-écosystèmes marins. Cela implique des investissements durables dans la connaissance, les infrastructures d'observation, les données et l'interdisciplinarité, mais aussi une mobilisation conjointe des États, des collectivités, des scientifiques, des acteurs économiques et de la société civile.

Faire de l'océan un pilier pleinement reconnu de l'approche One Health constitue aujourd'hui une nécessité stratégique pour accompagner les transitions écologiques et sociétales à venir.

Bibliographie

- BLASIAK R. *et al.* (2018), "Corporate control and global governance of marine genetic resources", *Science Advance*, 4, 5237.
- FAO (2024), "The state of world fisheries and aquaculture 2024 – Blue Transformation in action", Rome.
- FRÖLICHER T.L. *et al.* (2018), "Marine heatwaves under global warming", *Nature*, 560, pp. 360-364.
- KOESLING D. *et al.* (2025), "The relevance of One Ocean Health for the planet we want", *CABI One Health*, 4(1), 0024.
- LANDRIGAN P.J. *et al.* (2020), "Human health and ocean pollution", *Annals of Global Health*, 86, 151, doi: 10.5334/aogh.2831
- LIDSTRÖM S. *et al.* (2022), "The metaphor of ocean "health" is problematic; 'The Ocean We Want' is a better term", *Frontiers in Marine Science*, 9, doi: 10.3389/fmars.2022.818229
- LUCQ R. (2026), « L'océan, angle mort et levier stratégique du One Health ? », *amers*, 4 pages, Ifremer.
- SANCHEZ W. *et al.* (2026), « Le congrès One Ocean Science, un éclairage scientifique pour la 3^e conférence des Nations unies sur l'Océan », *Natures Sciences Sociétés*, sous presse.

Vers une observation intégrée des écosystèmes marins côtiers : enjeux, dispositifs et perspectives

Par Yannick GUEGUEN

Responsable de l'Unité COAST à l'Ifremer

Annie FIANDRINO

Référente Modélisation et Environnements côtiers à l'Ifremer

Lucie COCQUEMPOT

Coordination de l'observation océanographique à l'Ifremer

& Wilfried SANCHEZ

Responsable du thème transversal « Conjuguons un océan sain et nourricier » à l'Ifremer

Dans un contexte de changement global, les écosystèmes marins, en particulier côtiers, sont au cœur d'enjeux environnementaux, économiques et sociétaux majeurs. Leur complexité, liée à l'interaction de processus naturels et d'usages anthropiques, nécessite le développement d'approches d'observation intégrées pour comprendre leur fonctionnement et leur évolution.

Cet article présente les dispositifs d'observation existants et leurs perspectives en mettant en lumière le rôle structurant des réseaux et infrastructures, ainsi que les défis liés à l'interopérabilité et à la gestion des données. Il souligne l'apport des innovations récentes, telles que les approches moléculaires, l'imagerie et l'intelligence artificielle, pour améliorer la caractérisation des écosystèmes.

Introduction

Parce qu'elle constitue le socle de la connaissance, qu'elle permet de caractériser l'état des milieux, d'anticiper leurs évolutions et d'éclairer la prise de décision publique, l'observation scientifique joue un rôle fondamental (GOOS report, 2019). Elle est particulièrement précieuse pour les milieux marins côtiers qui sont des zones d'interaction forte entre les dynamiques naturelles, biotiques ou abiotiques, et les activités humaines. Ils apparaissent donc comme des zones particulièrement sensibles et stratégiques où se concentrent des enjeux écologiques, économiques et sociaux majeurs, en raison notamment de la richesse de leur biodiversité, de l'intensité des usages et du développement de l'économie bleue. Ces écosystèmes sont ainsi au cœur de transformations rapides et profondes, résultant du cumul des pressions locales et globales.

Saisir la complexité des dynamiques qui s'exercent au sein des écosystèmes marins côtiers appelle à une évolution des dispositifs d'observation vers des approches plus intégrées, capables de combiner des données issues de différentes origines et disciplines afin de répondre aux enjeux actuels de gestion durable et de transition vers un océan à la fois sain et nourri-

cier. Dans ce contexte, les séries temporelles longues constituent un élément essentiel pour l'analyse des socio-écosystèmes marins. Elles permettent de distinguer les tendances de fond des fluctuations naturelles et d'identifier les effets cumulés des pressions. Ces observations sont particulièrement importantes pour étudier les impacts du changement climatique, notamment en ce qui concerne les modifications de la distribution des espèces, les altérations des cycles biogéochimiques et la fréquence accrue des événements extrêmes, tels que les vagues de chaleur marines. Elles jouent également un rôle déterminant dans la calibration et la validation des modèles numériques, contribuant ainsi à l'amélioration des capacités de prévision et de scénarisation. Ces approches permettent d'anticiper les évolutions futures et de soutenir la prise de décision dans un contexte d'incertitude.

Les infrastructures de recherche, les réseaux d'observation et les pôles de données

L'observation des écosystèmes marins repose sur la combinaison de données issues de différentes dis-

ciplines, ainsi que sur l'intégration croissante des dimensions anthropiques. Cette approche mobilise des données issues de mesures *in situ*, de la télédétection satellitaire et de la modélisation numérique. La mise en œuvre de cette observation s'appuie sur des infrastructures de recherche, des réseaux d'observation et des pôles de données destinés à harmoniser, standardiser et pérenniser la collecte, le traitement, l'analyse et la diffusion des données à différentes échelles. Ces dispositifs jouent un rôle central dans la coordination des communautés scientifiques et répondent aux besoins de la recherche et des politiques publiques.

À l'échelle nationale, la structuration française de l'observation océanique repose notamment sur plusieurs infrastructures de recherche du Domaine Environnement dédiées à l'Océan (MESRI, 2022). Parmi elles, l'Infrastructure de Recherche Littorale et Côtière ILICO fédère les dispositifs d'observation consacrés aux écosystèmes côtiers et littoraux. Elle coordonne plusieurs Services Nationaux d'Observation complémentaires permettant de documenter les différentes composantes biologiques, physiques et biogéochimiques des milieux côtiers.

Parmi ces dispositifs figurent notamment :

- le réseau COAST-HF, dédié à l'observation en continu et à haute fréquence de la dynamique physique et biogéochimique des milieux côtiers afin de mieux comprendre la variabilité hydrologique, les événements extrêmes et les échanges le long du continuum terre-mer ;
- le PHYTOBS Network, qui documente la biodiversité phytoplanctonique, la dynamique de biomasse et les réponses des communautés aux changements environnementaux ;
- BENTHOBS, un réseau dédié au suivi de la macrofaune benthique à moyen et long terme.

En complément des infrastructures d'observation, la France s'est également dotée de pôles de données facilitant l'accès, l'interopérabilité et la valorisation des données environnementales. Pour l'océan, cette fonction est assurée par ODATIS, le pôle de données et de services pour l'océan qui fédère et diffuse les données marines en garantissant leur standardisation et leur accessibilité selon les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*).

En complément, plusieurs dispositifs nationaux de surveillance assurent le suivi opérationnel à long terme de l'état des milieux marins côtiers, en réponse aux exigences réglementaires nationales et européennes ainsi qu'aux enjeux sanitaires et environnementaux. Parmi les principaux réseaux figurent :

- ROCCH, le Réseau d'Observation de la Contamination Chimique du littoral, dédié au suivi des contaminants chimiques et de leur évolution temporelle ;
- REMI, réseau de contrôle microbiologique fondé sur le suivi d'*Escherichia coli* dans les coquillages vivants afin d'évaluer les niveaux de contamination microbiologique ;

- REPHY, réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines, qui suit la dynamique des populations phytoplanctoniques et les conditions hydrologiques associées ;
- EMERGTOX, réseau dédié à la détection des toxines marines émergentes, réglementées ou non, présentes dans les coquillages.

L'articulation entre ces dispositifs d'observation et de surveillance est renforcée par le système français d'observation de l'océan, Fr-OOS, qui vise à fédérer les infrastructures, réseaux opérationnels, campagnes écosystémiques et dispositifs de surveillance nationaux afin de favoriser l'intégration et le partage des observations océaniques. Le Fr-OOS constitue également la composante française des grands dispositifs européens (EOOS) et internationaux d'observation de l'océan (GOOS). Dans cette perspective, les initiatives européennes jouent un rôle croissant dans la coordination des observations marines et le développement d'approches harmonisées entre pays. Ainsi, une infrastructure européenne comme JERICO, miroir d'ILICO à plus large échelle, contribue à renforcer l'intégration des observations côtières européennes.

Vers une observation intégrée

L'enjeu principal réside désormais dans l'articulation des dispositifs et réseaux d'observation afin de produire une information intégrée et cohérente à l'échelle des socio-écosystèmes. Cela suppose une observation véritablement holistique, intégrée en fréquences, en échelles, en disciplines et dans le temps, capable de répondre à des besoins à la fois locaux et globaux, et construite « avec » et « pour » la société. Cette intégration repose sur des standards communs, des protocoles harmonisés et des systèmes d'information interopérables.

L'interopérabilité des données constitue un défi majeur : elle implique de croiser des données hétérogènes issues de sources multiples tout en garantissant leur qualité, leur traçabilité et leur accessibilité, conformément aux principes FAIR. Cette interopérabilité exige toutefois une structuration rigoureuse du cycle de vie de la donnée, de l'acquisition à la valorisation, incluant la validation, la documentation, l'archivage et la diffusion *via* des plateformes dédiées. Une telle structuration permet de transformer des initiatives ponctuelles en dispositifs d'observation pérennes et apprenants, favorisant les collaborations transdisciplinaires entre acteurs scientifiques, institutionnels et sociétaux.

La maîtrise de ce cycle conditionne la qualité et la réutilisabilité des données, donc leur intégration dans des approches multi-sources. Ces dispositifs permettent ainsi de convertir des données hétérogènes en indicateurs ou outils d'aide à la décision exploitables, contribuant à une meilleure compréhension et à une meilleure gestion des socio-écosystèmes marins.

L'apport des innovations récentes

Le développement d'approches moléculaires, telles que l'ADN environnemental (ADNe), ouvre de nouvelles perspectives pour l'observation intégrée des socio-écosystèmes marins, comme l'a montré le réseau d'observatoires de microbiologie environnementale déployé par l'Ifremer en 2020 (Siano *et al.*, 2026). Ces méthodes permettent de caractériser rapidement et sans impact la biodiversité à partir d'échantillons d'eau ou de sédiments, en détectant simultanément de nombreuses espèces, y compris des espèces rares ou difficiles à observer. Elles permettent également de suivre les communautés microbiennes, les agents pathogènes, les parasites ou les microalgues toxiques (Bass *et al.*, 2023), offrant ainsi des perspectives importantes pour la surveillance sanitaire des écosystèmes marins et des filières aquacoles, notamment *via* la détection précoce d'espèces émergentes ou invasives.

Au-delà de l'inventaire de la biodiversité, ces approches contribuent à la compréhension du fonctionnement des écosystèmes à travers l'analyse des interactions entre espèces et des dynamiques de communautés. Leur intégration avec les réseaux de surveillance existants

et les mesures physico-chimiques renforce la caractérisation des écosystèmes marins. La masse et la complexité des données produites favorisent le recours à l'intelligence artificielle pour l'analyse automatisée des séquences, la détection de signaux écologiques et l'intégration multi-sources. Leur déploiement à grande échelle reste toutefois limité par des enjeux de standardisation des protocoles, de qualité des bases de référence et d'interopérabilité des données.

En parallèle, les techniques d'imagerie, telles que les capteurs optiques, la vidéo sous-marine ou l'imagerie hyperspectrale, connaissent un essor rapide (Bajjouk *et al.*, 2026). Elles fournissent des données fines, continues et non destructives sur les habitats, les espèces et les dynamiques écologiques, particulièrement adaptées aux écosystèmes côtiers et benthiques. Elles permettent aussi d'observer directement les comportements et les interactions biologiques, en complément des mesures *in situ*. Leur développement s'appuie fortement sur les avancées en intelligence artificielle, notamment pour automatiser l'identification des espèces, la détection d'anomalies et l'analyse de longues séries d'images (Rubbens *et al.*, 2023).

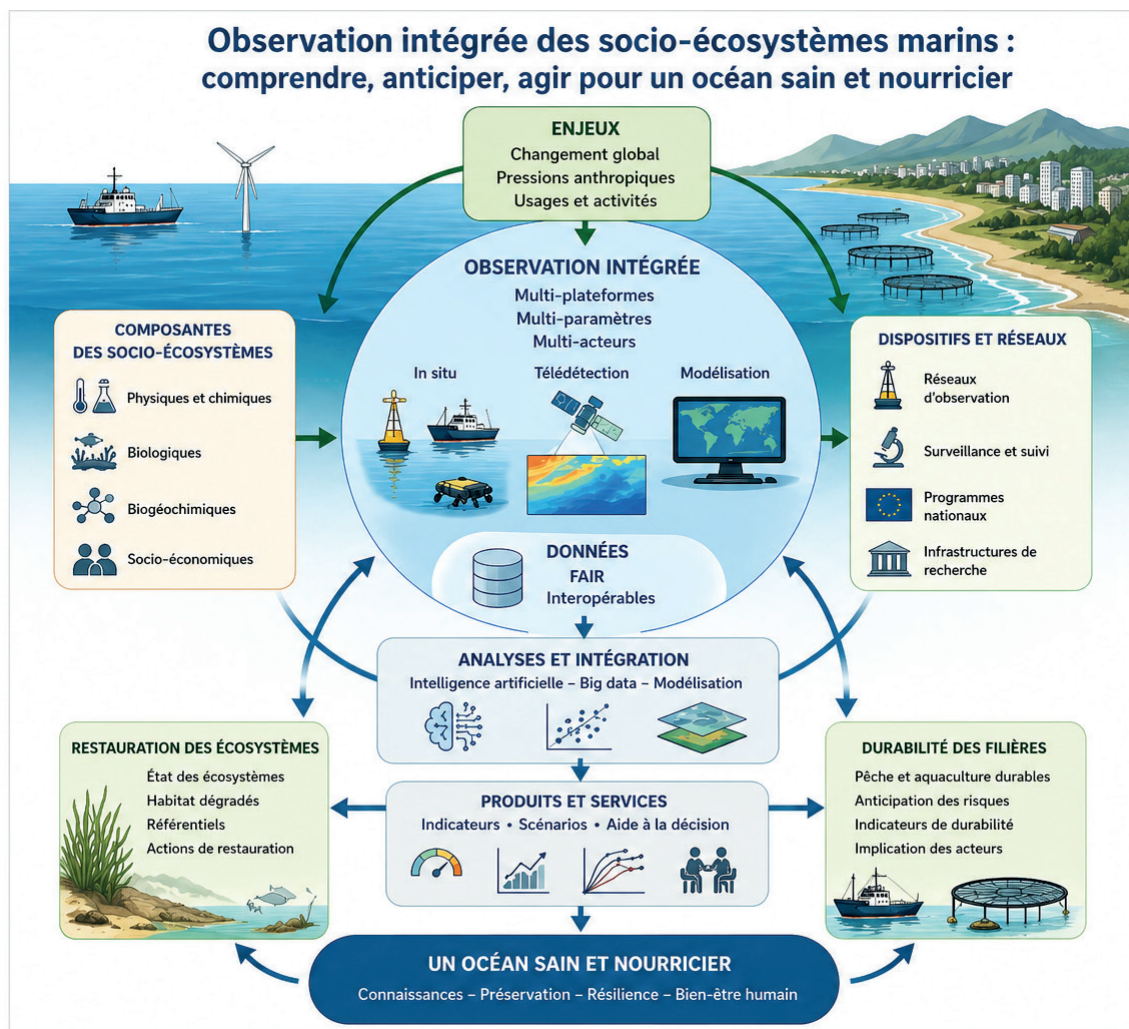


Figure 1 : Observation intégrée des écosystèmes marins côtiers et ses enjeux (Source : généré par IA).

Dans ce contexte, les méthodes d'analyse avancées fondées sur l'intelligence artificielle et les données massives ouvrent de nouvelles perspectives pour l'exploitation des données d'observation. Elles permettent d'identifier des *patterns* complexes, d'optimiser les réseaux d'observation et d'améliorer la détection des changements. Le couplage entre observation et modélisation constitue également un levier majeur pour développer des systèmes de prévision intégrés et des outils d'aide à la décision mobilisables par les gestionnaires et les acteurs des territoires dans un contexte d'incertitude croissante (Tanhua *et al.*, 2024).

L'observation participative : vers une science plus distribuée et collaborative

En complément des dispositifs institutionnels, l'observation participative connaît un développement croissant dans le domaine marin et constitue un levier prometteur pour renforcer la couverture spatiale et temporelle des observations. Cette approche repose sur l'implication d'acteurs non académiques – citoyens, plaisanciers, pêcheurs, associations, gestionnaires ou professionnels de la mer – dans la collecte, la transmission ou l'interprétation de données environnementales. C'est par exemple le cas du dispositif PHENOMER¹, qui invite les citoyens à signaler des phénomènes d'eaux colorées dus aux proliférations de microalgues.

En mobilisant des plateformes déjà présentes en mer, l'observation participative permet aussi de compléter les réseaux scientifiques traditionnels, en particulier dans des zones peu observées ou difficiles d'accès. Le développement de capteurs miniaturisés, d'instruments à faible coût, de technologies connectées et d'outils numériques facilite aujourd'hui l'intégration de ces approches dans les systèmes d'observation. Plusieurs initiatives locales, nationales, européennes et internationales explorent déjà le potentiel des navires opportunistes ou des plateformes citoyennes pour le suivi des paramètres océanographiques, de la biodiversité ou des déchets marins. Ces démarches s'inscrivent dans une logique d'observation distribuée, fondée sur la complémentarité entre dispositifs institutionnels et contributions participatives. Au-delà de l'acquisition de données, l'observation participative contribue également au renforcement du lien entre science et société et favorise l'appropriation des enjeux environnementaux par les citoyens.

Conclusion

Face à l'accélération des changements globaux, l'observation des écosystèmes marins doit désormais s'inscrire dans une logique pleinement intégrée, systémique et orientée vers l'action. Les avancées récentes en matière d'infrastructures, de technologies d'observation et de traitement des données offrent des opportunités inédites pour franchir ce cap, à condition de relever

simultanément les défis organisationnels, méthodologiques et politiques qu'implique cette transformation.

L'enjeu n'est pas uniquement scientifique : il est stratégique. Produire une information fiable, interopérable et accessible constitue un préalable indispensable pour éclairer les arbitrages publics, accompagner les politiques de transition écologique et permettre ainsi de concilier les impératifs de préservation de l'intégrité des écosystèmes et de maintien de la durabilité des activités économiques qui en dépendent. Dans cette perspective, l'observation intégrée apparaît comme une solution au service à la fois de la connaissance, de la gestion durable et de la souveraineté environnementale (voir la Figure 1).

Investir dans ces systèmes d'observation revient à se doter d'une capacité d'anticipation et d'adaptation. Cela suppose de soutenir la pérennité des réseaux existants, d'encourager l'innovation, de structurer la gouvernance des données et de renforcer les interfaces entre science, politiques publiques et acteurs socio-économiques.

Bibliographie

- BAJJOUK T., FERRERAM., PETIT T. & ARNAUBECA. (2026), « Projet Life Intégré Marha. Potentiel du capteur hyperspectral sous-marin (UHI) pour la cartographie et l'évaluation de l'état des habitats benthiques côtiers et profonds. Bilan d'activités de l'Ifremer pour le volet technologie », Réf. Rapport Final. DYNECO/LEBCO/202601-4TB, 54 pages, Ifremer, <https://doi.org/10.13155/113034>
- BASS D., CHRISTISON K.W., STENTIFORD G.D., COOK L.S.J. & HARTIKAINEN H. (2023), "Environmental DNA/RNA for pathogen and parasite detection, surveillance, and ecology", *Trends Parasitol*, 39(4), pp. 285-304, doi:10.1016/j.pt.2022.12.010, Epub 2023 Feb 8. PMID: 36759269.
- GOOS report (2019), "The Global Ocean Observing System 2030 Strategy", IOC, Paris, IOC Brochure 2019-5 (IOC/BRO/2019/5 rev.2), GOOS Report n°239, 24 pages.
- MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION (2022), « Stratégie nationale des infrastructures de Recherche (Edition 2021) », Deuxième édition mars 2022, 270 pages, <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/sites/default/files/2022-03/feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche---2021-v2--17318.pdf>
- SIANO R., ARZUL I., CHOMERAT N., GOBET A., NOËL C., BRIAND E., CHEVALIER M., CHEVIGNON G., CROTTIER A., DURAND P., FÉLIX C., FRANÇOISE S., GIANAROLI C., HERNANDEZ FARINAS T., LEBRUN L., LECADET C., LE GUYADER S., LEROI L., MARY C., MASON C., PARNAUDEAU S., PÉPIN JF., PIQUET JC., QUÉRÉ J., SCHMITT S., SERGHINE J., SEUGNET JL., SERAIS O., TERRE-TERRILLON A. & GOURMELON M. (2026), "Integrating coastal microbiome observations for human, oyster and environmental protection", bioRxiv, INPRESS, <https://doi.org/10.64898/2026.03.02.708974> ; <https://archimer.ifremer.fr/doc/01014/112524/>
- RUBBENS P., BRODIE S., CORDIER T., DESTRO BARCELLOS D., DEVOS P., FERNANDES-SALVADOR J.A., FINCHAM J.I., GOMES A., HANDEGARD N.O., HOWELL K., JAMET C., KARTVEIT K.H., MOUSTAHDID H., PARCERISAS C., POLITIKOS D., SAUZÉDE R., SOKOLOVA M., UUSITALO L., VAN DEN BULCKE L., VAN HELMOND A.T.M., WATSON J.T., WELCH H., BELTRAN-PEREZ O., CHAFFRON S.,

¹ <https://www.phenomer.org/>

GREENBERG D.S., KÜHN B., KIKO R., LO M., LOPES R.M., MÖLLER K.O., MICHAELS W., PALA A., ROMAGNAN J.-B., SCHUCHERT P., SEYDI V., VILLASANTE S., MALDE K. & IRISSON J.-O. (2023), "Machine learning in marine ecology: an overview of techniques and applications", *Ices Journal Of Marine Science*, 80(7), pp. 1829-1853, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsad100> ; <https://archimer.ifremer.fr/doc/00850/96150/>

TANHUA T., LE TRAON P.-Y., KÖSTNER N., EPARKHINA D., NAVARRO G., DUNBAR M.B., SPEICH S., PASCUAL A., VON SCHUCKMANN K., LIGUORI G., KARSTENSEN J., HASSOUN A.E.R., VAN DOORN E., BARCELÓ-LLULL B., GÓMEZ B.P., CUSACK C., HESLOP E., LARA-LOPEZ A., PETIHAKIS G., TELSZEWSKI M., PALACZ A.P., WILMER-BECKER K., PEARLMAN J., MUÑIZ PINIELLA Á., HEYMANS J.J. & LIPS I. (2024), "Towards a sustained and fit-for-purpose European ocean observing and forecasting system", *Front. Mar. Sci.*, 11:1394549, <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1394549>

Virus humains : des eaux usées aux coquillages, comment protéger le consommateur ?

Par Soizick F. LE GUYADER, Marion DESDOUITS,
Joanna OLLIVIER & Pascal GARRY

Unité Microbiologie, Aliment, Santé et Environnement, LSEM, Nantes

Les zones littorales françaises jouent un rôle économique et touristique majeur grâce à la conchyliculture et à la pêche récréative. Cependant, depuis plusieurs décennies, l'augmentation des activités humaines sur le littoral entraîne une dégradation de la qualité des eaux, et par voie de conséquence, de la qualité microbiologique des coquillages. En particulier, les huîtres, consommées crues, sont souvent impliquées dans des épidémies de gastroentérite d'origine virale. La contamination, apportée par les rejets humains, survient lorsque les eaux usées ne sont pas suffisamment traitées.

Les huîtres vont ensuite concentrer les particules virales lors de leurs activités physiologiques, et, à l'heure actuelle, les norovirus représentent le risque majeur lié à leur consommation. Dans une approche de « santé unique » reliant santé humaine, santé environnementale et activité économique, préserver la qualité microbiologique des eaux côtières permettra à la fois de protéger les consommateurs, de maintenir l'ostréiculture et de préserver les écosystèmes littoraux.

Les coquillages occupent une place importante dans l'activité économique et touristique des façades littorales françaises. Que ce soit pour une filière professionnelle telle que la conchyliculture, un des principaux secteurs économiques en zone côtière¹, ou pour la pêche récréative, attraction touristique souvent appréciée, la qualité sanitaire des mollusques bivalves doit être préservée.

La diversité des coquillages est large, mais, parmi les diverses espèces de coquillages consommés, l'huître creuse, *Magallana gigas*, occupe une place particulière. Souvent consommée au printemps, ou lors des fêtes de fin d'année, l'huître est reconnue comme une source de vitamines et de minéraux comme le fer et le magnésium (Venugopal *et al.*, 2017). En particulier, sa consommation crue préserve cette qualité nutritionnelle. Cependant, son habitat situé en zone littorale est soumis à une pression anthropique croissante depuis des années, avec des contaminations par les eaux usées en augmentation et, en conséquence, l'apparition de pathologies chez les consommateurs.

L'implication des coquillages dans des épidémies alimentaires est connue depuis plus d'un siècle et des réglementations ont été mises en place pour protéger le consommateur, comme le classement sanitaire des

zones de production (règlement européen 2019/627). Ce classement, basé sur des critères bactériologiques, a permis de diminuer de façon significative les toxi-infections alimentaires collectives (TIAC) d'origine bactérienne liées à la consommation de coquillages. Cependant des épidémies de gastro-entérites virales persistent (Rowan, 2023). Les virus qui en sont responsables, issus des rejets humains, peuvent être les témoins d'une dégradation de la qualité microbiologique des eaux côtières.

Préserver la qualité sanitaire des coquillages est donc important pour la santé publique mais également pour préserver l'état écologique du littoral si l'on considère le coquillage comme une sentinelle de ces milieux.

Les eaux usées, sources de la contamination virale

La contamination des eaux littorales est apportée majoritairement par les rejets de stations d'épuration, parfois peu efficaces pour éliminer les virus. Mais ces rejets ne sont pas les seules voies d'apport en milieu littoral. Par exemple, des accidents sur le réseau (rupture ou fuite d'une canalisation, panne d'un poste de relèvement), des pluies importantes entraînant des débordements ou des surcharges hydrauliques, la saturation des sols suite à des pluies répétées, ou encore l'assainissement non collectif constituent quelques exemples des sources d'apport de la contamination en zone littorale (voir la Figure 1). La possibilité réglementaire pour les

¹ En 2024, avec un chiffre d'affaires de 564 M€, la France est au premier rang européen pour la production de coquillages en valeur, la filière occupe 18 280 employés.

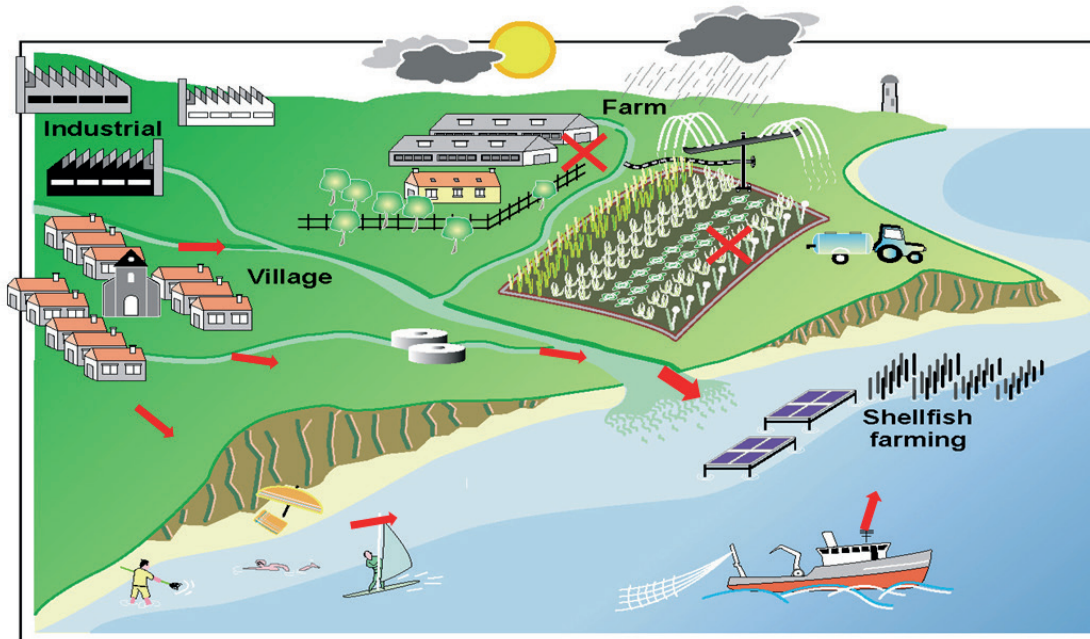


Figure 1 : Diversité des voies d'apport de la contamination d'origine humaine en zone littorale (Source : Ifremer).

traiteurs d'eaux usées de rejeter des eaux non traitées peut éventuellement participer à ces apports en zones littorales.

Les eaux usées humaines sont le reflet de la population environnante et font l'objet de nombreuses analyses, tant chimiques (résidus de médicaments, pesticides...) que microbiologiques (parasites, bactéries et virus). En effet, à l'interface entre l'humain, les animaux et l'environnement, les eaux usées présentent un intérêt majeur pour la surveillance des agents pathogènes et de leur évolution. La crise sanitaire liée au Sars-CoV-2 a rappelé l'intérêt du suivi dans ces eaux usées pour évaluer les mesures de gestion mises en place et identifier l'émergence de variants pathogènes (Barbé *et al.*, 2022). La mise en place d'une plateforme de recherche, regroupant des acteurs de l'environnement, universitaires et hospitaliers, dédiée à l'analyse de ces eaux usées (OBEPINE+²) va permettre de renforcer cette approche. Par ailleurs, cette plateforme dédiée à l'émergence de potentiels agents pathogènes pour l'humain constitue un élément complémentaire important pour prévenir une atteinte du milieu littoral (Boni *et al.*, 2024).

Les norovirus, agents majeurs des épidémies liées à la consommation de coquillages

Malgré la diversité des virus excrétés dans les eaux usées, à l'heure actuelle, le risque infectieux majeur

pour les consommateurs réside dans la contamination des huîtres par les norovirus. Ces virus sont de petits virus à ARN non enveloppés et constituent la principale cause de gastro-entérites aiguës chez les humains (Prasad *et al.*, 2025). La courte période d'incubation (24 heures en moyenne), laisse place à des épisodes de vomissements et de diarrhées. Ces virus sont très infectieux, quelques particules virales (10 à 100 particules infectieuses) suffisant à entraîner des symptômes, tandis que l'immunité acquise lors des infections persiste peu (Prasad *et al.*, 2025). Après infection, l'excrétion virale dans les selles peut être élevée et prolongée dans le temps (deux à trois semaines après disparition des symptômes). Cette excrétion est observée également chez des porteurs asymptomatiques, expliquant les quantités très élevées de particules virales présentes dans les eaux usées.

Après rejet, ces virus vont persister dans l'environnement. Mettre en évidence leur pouvoir infectieux (capacité à se multiplier dans des cellules) nécessite l'utilisation de cellules souches intestinales humaines, les entéroïdes, qui permettent la réplique *in vitro* de certains virus. Ce modèle nous a permis de démontrer la persistance de particules infectieuses de norovirus dans de l'eau de mer naturelle à 12°C et à l'obscurité, pendant plusieurs semaines (Desdouits *et al.*, 2022).

Les huîtres, filtrant de grands volumes d'eau de mer pour leurs activités physiologiques (alimentation, respiration...), vont alors accumuler ces norovirus lorsque des rejets d'eaux usées atteignent leurs zones de production. La contamination est rapide et perdure dans le temps comme mis en évidence par la détection du génome de ces virus. Elle met ainsi en échec les pratiques de purification usuelles des ostréiculteurs. Les norovirus, strictement humains, ne vont pas se multiplier dans l'huître mais vont persister dans les tissus

² OBEPINE+, Observatoire épidémiologique dans les eaux usées, plateforme une seule santé, France 2030, Stratégie d'accélération maladies infectieuses émergentes (MIE) et menaces NRBC (MN) 2022.

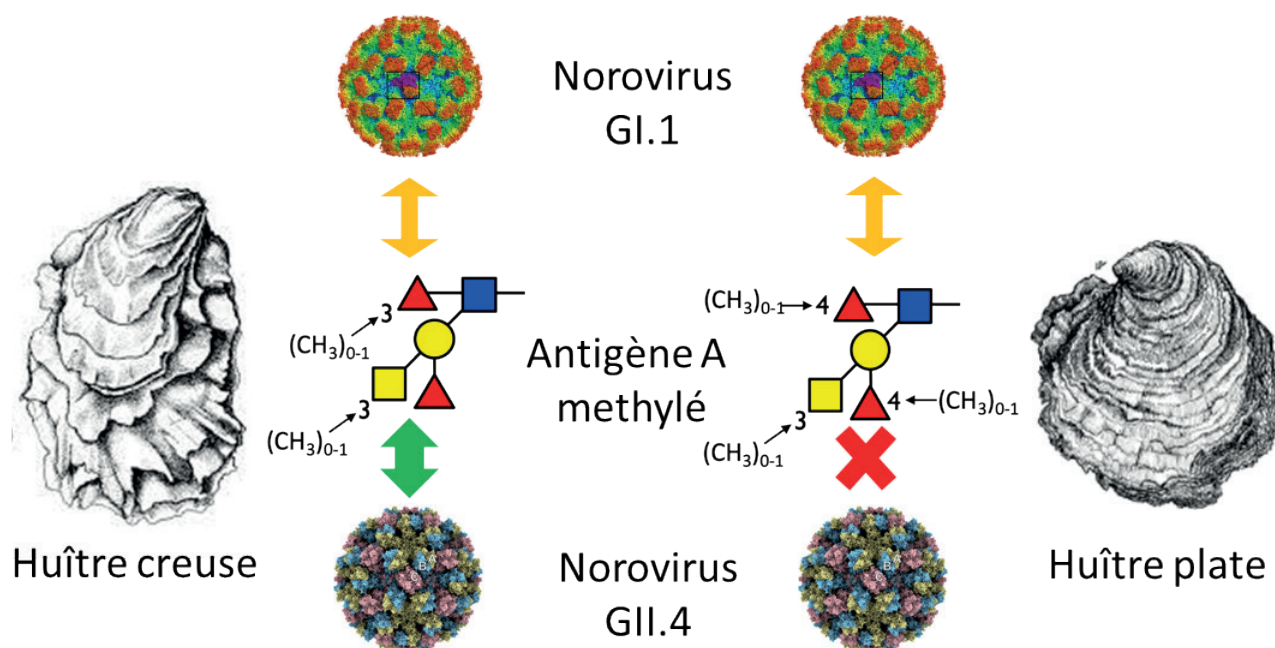


Figure 2 : Structure des glycanes responsable des interactions de deux souches de norovirus (GI.1 et GII.4) avec deux espèces d'huître (Source : Compte rendu final du projet ANR GOyAVE, Le Guyader FS *et al.*).

digestifs par des mécanismes restant à élucider. L'identification de molécules fixant spécifiquement les norovirus dans les tissus de l'huître creuse a démontré que celle-ci n'était pas juste un filtre passif, mais accumulait spécifiquement les norovirus (Le Guyader *et al.*, 2006). Ces ligands, des molécules de type glycanes, responsables de cette capture, ont été identifiés et présentent des variations selon les espèces d'huître (Auger *et al.*, 2023).

Comment limiter la survenue de ces épidémies ?

Une méthode officielle (ISO 15207 parties 1 et 2) existe depuis 2015 pour la détection et la quantification des norovirus dans les aliments, dont les coquillages. Elle constitue une étape importante pour échanger entre pays et structurer des réseaux de laboratoires pouvant détecter et quantifier ces virus. La norme, basée sur l'approche RT-PCR en temps réel, intègre un panel de contrôles qualité afin d'assurer la fiabilité des résultats, mais détecte le génome des particules virales sans information sur le caractère infectieux. À l'heure actuelle, en l'absence de critères européens, la recherche de norovirus dans les huîtres est réalisée *a posteriori*, lors de la survenue de cas humains de gastro-entérites. Lors de cas groupés de gastro-entérites potentiellement liées à la consommation de coquillages, une enquête de traçabilité est réalisée et des prélèvements sont effectués afin de confirmer l'implication des coquillages. Les actions à mettre en place suivent une instruction technique qui cadre les conditions pouvant mener à une fermeture de zones de production de coquillages, basées sur un nombre suffisant d'indices concordants, ainsi que les mesures de retrait et de rappel de coquillages

commercialisés (DGAI, 2024). Néanmoins, la période entre l'identification des lots contaminés, leur commercialisation et leur retrait de la vente peut potentiellement exposer les consommateurs au risque d'infection.

Plutôt qu'une réaction *a posteriori*, mettre en place des actions permettant de prévenir la contamination des zones côtières a donc toute son importance. Par exemple, le contrôle sanitaire mis en place par l'Ifremer depuis plus de 30 ans pour répondre à la réglementation permet d'objectiver les tendances à l'amélioration ou à la dégradation de la qualité microbiologique, et d'identifier des ruptures tranchées de cette qualité. Cette analyse pourrait être associée à une réflexion sur la notion de zones à risque pour contribuer à diminuer les apports et améliorer la qualité microbiologique. En parallèle, les informations obtenues lors de la survenue de TIAC permettent d'analyser les facteurs tels que les événements climatiques (fortes pluies, tempêtes...) ou des accidents sur le réseau (rupture de canalisation, panne d'un poste de relèvement...) favorisant ces contaminations. Plusieurs projets de recherche, comme le projet européen Previr³, visent actuellement à développer et mettre à disposition des professionnels de la conchyliculture des modèles prédictifs de la contamination utilisant des données météorologiques, environnementales et épidémiologiques. Ainsi, la mise à l'abri des coquillages permettra d'éviter la mise sur le marché d'huîtres contaminées.

³ PREVIR, Towards an early-warning tool predicting enteric virus contamination of coastal watersheds, Water4all-2022-00262.

Préserver la qualité des eaux côtières dans un concept de santé unique

La pression humaine sur les zones littorales est de plus en plus manifeste par le développement de l'habitat, mais également par des activités économiques (élevage, maraîchage...) sur le bassin versant. Il est donc important de se rappeler qu'en plus d'être l'ultime réceptacle des pollutions humaines, le milieu côtier représente un environnement complexe propice à la diffusion d'agents pathogènes issus de différentes sources. Protéger la qualité microbiologique des eaux côtières permettra, dans un objectif de santé unique :

- de préserver l'état écologique des zones côtières ;
- de protéger la santé publique *via* la qualité des coquillages ou autres usages récréatifs ;
- et de maintenir une activité économique locale telle que l'ostréiculture.

Références

- AUGERA, YU S-Y., GUU S-Y. *et al.* (2023), "Species-specific N-glycomes and methylation patterns of oysters *Crassostrea gigas* and *Ostrea edulis* and their possible consequences for the norovirus–HBGA interaction", *Marine Drugs*, 21, pp. 342. <https://doi.org/10.3390/md21060342>
- BARBÉ L., SCHAEFFER J., BESNARD A. *et al.* (2022), "SARS-CoV-2 whole genome sequencing using oxford nanopore technology for variant monitoring in wastewaters", *Frontiers in Microbiology*, 13, 889811, <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.889811>
- BONI M., WURTZER S., MOUCHEL J-M. *et al.* (2024), "Implementation of a national wastewater surveillance system in France as a tool to support public authorities during the Covid crisis: the Obepine project", pp. 133-161, in *Wastewater surveillance for Covid-19 management*, The Handbook of Environmental Chemistry, 125, Kumar M., Kuroda K., Mukherjee S. *et al.* Editors, <https://doi.org/10.1007/978-3-031-53906-0>
- DESDOUITS M., POLO D., LE MENNEC C. *et al.* (2022), "Use of human enteroids to evaluate persistence of infectious human norovirus in seawater", *Emerging Infectious Diseases*, 28, pp. 1475-1479, <https://doi.org/10.3201/eid2807.220219>
- Direction Générale de l'Alimentation (2024), « Gestion du risque norovirus en lien avec la consommation de coquillages », DGAL/SDSSA/2024-673, 06/12/2024.
- ISO 15216-1 (2017), "Microbiology of food and animal feed—horizontal method for determination of hepatitis A virus and norovirus in food using real-time RT-PCR", part 1: method for quantification, part 2: method for detection.
- LE GUYADER F.S., LOISY F., ATMAR R.L. *et al.* (2006), "Norwalk virus-specific binding to oyster digestive tissues", *Emerging and Infectious Disease*, 12, pp. 931-936.
- PRASAD B.V.V., ATMAR R.L., RAMANI S. *et al.* (2025), "Norovirus replication, host interactions and vaccine advances", *Nature Reviews*, 23, pp. 385-401, <https://www.nature.com/articles/s41579-024-01144-9>
- ROWAN N.J. (2023), "Current decontamination challenges and potentially complementary solutions to safeguard the vulnerable seafood industry from recalcitrant human norovirus in live shellfish: Quo Vadis?", *Science of the Total Environment*, 874, 162380, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162380>
- VÉNUGOPAL V. & GOPAKUMAR K. (2017), "Shellfish: nutritive value, health benefits and consumer safety", *Comprehensive Reviews in Food science and Food Safety*, 16, pp. 1219-1242, <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12312>

Pollution plastique de l'océan : état des lieux, lacunes des connaissances et leviers pour l'action publique

Par Arnaud HUVET, Ika PAUL-PONT

Université de Brest, Ifremer, CNRS, IRD, LEMAR

Xavier COUSIN

MARBEC, Université de Montpellier, CNRS, Ifremer, IRD, INRAE

& Wilfried SANCHEZ

Ifremer, direction générale, Station de Sète

La pollution plastique marine est une menace majeure pour l'océan. Présente sous forme de macro-, micro- et nanoplastiques, elle touche tous les milieux marins et est issue des activités humaines terrestres et maritimes. Les plastiques affectent la biodiversité par ingestion, enchevêtrement, dégradation des habitats et transport de contaminants chimiques ou microbiologiques. Les micro- et nanoplastiques, et les substances chimiques associées, soulèvent des inquiétudes sanitaires *via* la contamination de la chaîne alimentaire. Malgré des progrès scientifiques, de fortes incertitudes persistent sur leurs concentrations, leurs effets à long terme et les risques pour l'humain. Les priorités sont d'améliorer la détection, standardiser les méthodes, cartographier les risques et évaluer l'efficacité des politiques publiques. Une action coordonnée et internationale est jugée indispensable pour réduire durablement cette pollution.

Introduction : la pollution plastique de l'océan

La pollution plastique constitue l'une des pressions anthropiques les plus diffuses, persistantes et complexes affectant les écosystèmes océaniques [1]. Avec une production annuelle mondiale de plastiques de 460 millions de tonnes (Mt) en 2019, ce ne sont pas moins de 353 Mt de déchets plastiques qui ont été produits [2].

Omniprésente et multiforme, cette pollution plastique se caractérise par des déchets répartis le long d'un continuum de tailles allant des macroplastiques visibles à l'œil nu jusqu'aux microplastiques (inférieurs à 5 mm) et aux nanoplastiques invisibles (inférieurs à 1 μm).

Cette hétérogénéité, associée à une infinie variété de formes, de types de polymères, de degré de vieillissement, ainsi que de charge en additifs et en contaminants chimiques et biologiques [3], conditionne leur dispersion, leurs interactions avec le vivant et leurs effets, faisant des plastiques une triple menace pour la biodiversité marine.

Une présence généralisée dans tous les compartiments marins

La pollution plastique dans les océans est ubiquiste, de la surface aux sédiments les plus profonds, des zones côtières fortement urbanisées aux régions inhabitées comme les pôles ou les îles isolées, où ils contaminent la colonne d'eau, les sédiments et la vie marine [1]. Si les gyres océaniques concentrent une part significative des débris flottants, les environnements côtiers agissent comme des zones de transit et/ou de stockage influencées par les sources et l'hydrodynamisme. Situés à l'interface entre les systèmes terrestres et marins, ces derniers sont exposés à une forte pression liée aux apports continentaux, qui constituent la source majeure de pollution plastique en mer. Les déchets urbains, le ruissellement des eaux pluviales, les rejets issus des réseaux d'assainissement, les apports fluviaux ainsi que les dépôts atmosphériques contribuent de manière significative à l'introduction de débris plastiques dans le milieu récepteur. À ces sources terrestres s'ajoutent des apports d'origine maritime, tels que les activités de pêche, l'aquaculture et le transport maritime, dont l'importance peut être localement prépondérante [4]. Dans un contexte de croissance démographique et d'intensification des usages du littoral, l'urbanisation croissante

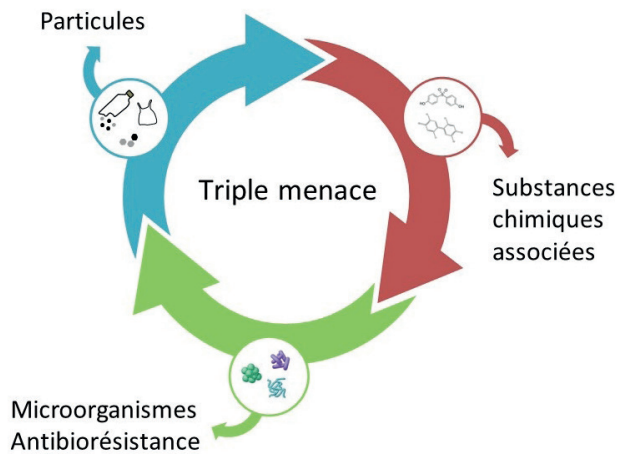


Figure 1 : La pollution plastique de l'océan
(Source : Xavier Cousin).

des zones côtières, l'essor du tourisme ou les épisodes de précipitations intenses amplifiés par le changement climatique, augmentent le transfert de déchets plastiques vers le milieu marin.

Des impacts multiples partiellement connus

Les impacts de cette pollution sont multiples avec des conséquences environnementales, sanitaires et socio-économiques. Les effets des macroplastiques sur la faune marine sont aujourd'hui largement documentés : ingestion, enchevêtrement, blessures, altération des habitats et vecteur de dispersion d'espèces nuisibles ou invasives [5]. Concernant les microplastiques et nanoplastiques, leur ingestion a été largement démontrée dans la nature chez les organismes étudiés [1], [4], [5]. Expérimentalement, leur ingestion provoque des réponses physiologiques, cellulaires et moléculaires chez un large éventail d'organismes marins avec de potentiels effets sur les populations [1], [4], [5] probablement sous-estimés pour les particules les plus petites. La toxicité observée est liée à la fois à leurs propriétés physiques (taille, rugosité), à la vectorisation de microorganismes dont certains sont pathogènes, et aux produits chimiques, ce qui rend la compréhension de leur toxicité complexe [3]. Notamment, la diversité des substances chimiques associées aux matières plastiques et le manque flagrant d'informations concernant leur nature et leur toxicité freinent la caractérisation du risque associé pour la biosphère. Plus de 16 000 composés chimiques sont utilisés dans la formulation des plastiques, dont 4 000 sont toxiques [6].

La capacité des plastiques à transporter des contaminants chimiques et/ou des micro-organismes, ainsi que le développement d'îlots d'antibiorésistance observé à la surface de débris plastiques, sont des préoccupations sanitaires, notamment en raison de l'intégration des microplastiques dans la chaîne alimentaire, contribuant à l'exposition des populations humaines [1]. Par ailleurs, les répercussions économiques sont significatives, notamment pour les territoires littoraux [7]. Elles affectent les secteurs de la pêche et de l'aquaculture, le tourisme ; et les collectivités doivent faire face à des

coûts croissants liés aux opérations de nettoyage et de gestion des déchets. Le coût global annuel de la pollution plastique est estimé à 2 200 milliards de dollars américains, dont 1 500 milliards liés aux dommages causés aux océans [8] auxquels il convient d'ajouter les coûts en termes de santé humaine (1 500 à 3 740 milliards de dollars américains) [9].

Perspectives scientifiques : combler les lacunes pour mieux orienter l'action

Face à l'ampleur et à la complexité de la pollution plastique, les priorités scientifiques actuelles s'inscrivent dans une logique d'appui à l'action publique. Il s'agit non seulement d'améliorer la compréhension des sources, des flux et des impacts de cette pollution, mais également de produire des connaissances opérationnelles, notamment tournées vers les solutions permettant de guider les stratégies de gestion et d'évaluation.

Mieux caractériser la pollution plastique

L'un des défis majeurs réside dans la détection et la quantification des microplastiques les plus petits (< 50 µm) et des nanoplastiques, dont les concentrations environnementales restent encore inconnues. Les avancées récentes en instrumentation ouvrent des perspectives prometteuses, mais nécessitent encore des efforts de validation et d'harmonisation [10]. La normalisation des méthodes constitue ainsi un enjeu central afin de garantir la robustesse et la comparabilité des données à différentes échelles spatiales et temporelles. Il s'agit d'une étape essentielle pour l'élaboration de bases de données permettant d'établir un état des lieux fiable et de suivre l'évolution de cette pollution et l'efficacité de potentielles mesures d'action.

Une meilleure compréhension des sources et des flux de plastiques entre les milieux aériens, terrestres et aquatiques est aussi indispensable. L'identification des zones d'accumulation, qu'elles soient de surface, dans la colonne d'eau, ou sédimentaires, permettra un bilan exhaustif de la contamination et d'optimiser les actions de surveillance et de ciblage des mesures de réduction. Dans cette optique, le développement d'indicateurs robustes, intégrant les concentrations, les flux et les effets biologiques, est essentiel pour soutenir les politiques publiques.

Comprendre les impacts dans un contexte d'exposition réaliste

La compréhension des effets des microplastiques et des nanoplastiques sur la vie marine est essentielle pour fournir des bases scientifiques solides à la prise de décision. Des expériences en laboratoire menées dans des conditions contrôlées le plus souvent à l'échelle des individus, avec seulement quelques types

de micro- et nanoplastiques ont établi ces effets. Il en résulte un double enjeu :

- la compréhension des mécanismes d'action des micro- et nanoplastiques, y compris à l'échelle des populations et des communautés ;
- la mise en place d'expositions réalistes intégrant leur caractère multifactoriel et multigénérationnel.

Les approches corrélatives spatialisées à grande échelle, à l'instar des études épidémiologiques réalisées chez l'humain, figurent parmi les approches scientifiques qui permettront de relever ce défi. Elles évalueront les conséquences réelles de l'exposition chronique aux plastiques sur la biodiversité marine, en prenant en compte la diversité des espèces et des habitats, et la complexité de la contamination plastique. Elles contribueront à l'élaboration de scénarios réalistes concernant la résilience ou, à l'inverse, les risques de déclin et d'extinction de populations marines.

Enjeux de sécurité alimentaire des produits de la mer

Dans ce contexte, les enjeux de sécurité alimentaire deviennent centraux. Cependant, le transfert des micro- et des nanoplastiques et des contaminants associés au sein des réseaux trophiques, ainsi que leur potentiel impact sur la santé humaine sont actuellement complexes à estimer, en raison de limitations technologiques qui constituent autant de verrous à lever. La contamination en micro- et nanoplastiques des produits de la mer ne représenterait qu'une faible part (< 10 %) de l'exposition totale aérienne (inhalation) et alimentaire de l'humain [11]. Néanmoins, le manque de données sur la contamination par les petits microplastiques et les nanoplastiques complique l'évaluation des risques et la définition de seuils sanitaires fiables. Les microplastiques vont majoritairement transiter dans le tube digestif, dès lors sauf à consommer le système digestif, l'exposition à ces microplastiques est limitée voire nulle. Pour les nanoplastiques, une translocation, c'est-à-dire un passage au travers des membranes digestives et une contamination du système circulatoire et d'autres organes est possible, augmentant le risque d'exposition humaine, à l'instar des contaminants chimiques associés aux plastiques qui vont être transférés dans l'organisme par désorption, indépendamment de la taille des particules ingérées.

Une cartographie des risques

Les écosystèmes marins sont hétérogènes en termes d'habitat, de biodiversité et d'exposition aux pressions anthropiques, dont la pollution plastique n'est qu'un des aspects. Pour être performante et efficace la gestion de ces écosystèmes doit relever le défi de l'intégration de toutes ces composantes et de l'anticipation de leurs évolutions. L'essor récent de la planification spatiale marine, plus précisément la compilation de cartographies spatiales de ces différentes composantes, constitue un outil stratégique majeur pour la gestion des écosystèmes marins [12]. Son développement, couplé à la prévision temporelle, est maintenant nécessaire pour une gestion écosystémique proactive plutôt que réac-

tive, par exemple dans la définition des aires marines protégées (mieux ciblées et plus efficaces), dans l'anticipation des risques d'extinction locale ou globale, sous couvert de connaissances des capacités d'adaptation du vivant aux changements globaux incluant la pollution plastique.

Évaluer l'efficacité des solutions

Au-delà de l'acquisition de connaissances, il est crucial d'évaluer l'efficacité des mesures mises en œuvre pour lutter contre la pollution plastique. Cela implique de développer des cadres d'évaluation permettant de mesurer l'impact réel des politiques publiques, comme proposé dans le traité international juridiquement contraignant visant à lutter contre la pollution plastique [13], qui prend en compte la totalité du cycle du plastique, depuis l'extraction des ressources fossiles jusqu'à la gestion de fin de vie des déchets plastiques.

Le principe de hiérarchie des déchets, inscrit dans le droit européen (directive 2008/98/CE), contient déjà de nombreux éléments pour agir contre la pollution plastique. Le premier et plus efficace levier d'action pour réduire les déchets est la limitation de la production et de l'usage des plastiques – environ 50 % des plastiques sont considérés comme non essentiels. Le second niveau est de penser, tout au long de la chaîne de valeur, en termes de réemploi. Le recyclage et la valorisation énergétique constituent des approches qui peuvent contribuer à la limitation de la pollution plastique mais qui apparaissent à la fois coûteux et peu efficaces. La mise en place de la responsabilité élargie du producteur est un moyen de contribuer au financement de ces approches. Le développement de matériaux alternatifs pour les plastiques jugés essentiels est une approche de nature à promouvoir l'innovation et le développement économique, tout en tenant compte des principes de l'éco-conception. Ces éléments constituent des leviers pour orienter les politiques publiques, les choix scientifiques, industriels et citoyens.

Cette gouvernance implique une meilleure coordination entre politiques publiques souvent sectorisées (eau, déchets, mer, climat), afin d'assurer leur cohérence et leur complémentarité. Les négociations sur le traité plastique n'ont pas encore abouti et se poursuivront en 2027. Le traité sera plus efficace s'il est validé par consensus. Le blocage actuel est dû à un petit groupe de pays opposés à certaines mesures, telles que la réduction de la production de plastique primaire ou la prise en compte de la santé humaine, et ce malgré le soutien d'une majorité de pays (plus de 100) en faveur de mesures ambitieuses et contraignantes. En attendant, à l'échelle locale, la mobilisation coordonnée des acteurs et des territoires, au premier rang desquels les collectivités, joue un rôle clé dans la mise en œuvre d'une gestion intégrée terre-mer. Cette dynamique doit s'accompagner d'une implication renforcée des acteurs économiques afin de favoriser des pratiques plus durables et de co-construire des solutions adaptées aux réalités locales.

À l'échelle internationale, la coopération, en particulier au sein des bassins maritimes partagés, est indispen-

sable pour traiter une pollution qui ignore les frontières. Dans ce cadre, les instruments économiques tels que les incitations financières, les mécanismes de responsabilité élargie des producteurs ou encore la fiscalité écologique constituent des outils structurants pour orienter les évolutions.

Et pour conclure

La pollution plastique de l'océan s'impose comme un enjeu systémique, à l'interface des dynamiques environnementales, sanitaires, économiques et sociétales. Sa nature diffuse, sa persistance et la complexité de ses formes et de ses effets en font une pression singulièrement difficile à appréhender et à maîtriser. Si les connaissances ont considérablement progressé ces dernières décennies, notamment sur la distribution des plastiques et les impacts des macrodéchets, des incertitudes majeures subsistent, en particulier concernant les micro- et nanoplastiques, leurs effets à long terme et leurs interactions avec l'ensemble des pressions qui constituent l'exposome océanique.

Ces lacunes scientifiques ne sont pas neutres : elles limitent la capacité à évaluer précisément les risques, à définir des seuils de référence et à orienter efficacement les politiques publiques. Elles soulignent la nécessité d'un changement d'échelle et de paradigme dans les approches de recherche, fondé sur l'intégration des disciplines, la standardisation des méthodes et le développement d'outils d'observation et de modélisation robustes. Dans le même temps, elles ne doivent pas constituer un frein à l'action. Le caractère avéré de certains impacts, conjugué au principe de précaution, justifie la mise en œuvre immédiate de mesures ambitieuses prenant en compte la totalité du cycle de vie des plastiques et fondées sur la réduction de la production, la transformation des modes de production et de consommation, et l'amélioration de la gestion des déchets. L'enjeu n'est donc plus seulement de mieux comprendre, mais d'articuler production de connaissances et action publique.

La lutte contre la pollution plastique appelle une gouvernance intégrée, coordonnée du local à l'international, mobilisant l'ensemble des acteurs et s'appuyant sur des outils rigoureux d'évaluation. C'est l'enjeu des négociations pour aboutir à un traité efficace contre la pollution plastique afin de construire des trajectoires crédibles de réduction de la contamination, de préservation de la biodiversité marine et de sécurisation des usages liés à l'océan, dans un contexte de changement global.

Références

- [1] THOMPSON R.C. *et al.* (2024), "Twenty years of microplastics pollution research-what have we learned?", *Science*, 386, eadl2746.
- [2] OCDE (2023), « Perspectives mondiales des plastiques : Déterminants économiques, répercussions environnementales et possibilités d'action », Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/5c7bba57-fr>
- [3] ROCHMAN C.M. *et al.* (2019), "Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite", *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38, pp. 703-711.
- [4] HUVET A *et al.* (2025), "The issues of micro-nanoplastics in the oyster and mussel aquaculture sector", *Reviews In Aquaculture*, 17(4), e70047.
- [5] COUSIN X. *et al.* (2025), *Pollution plastique, la biodiversité menacée*, 188 pages, Éditions Quæ.
- [6] MONCLÚS L. *et al.* (2025), "Mapping the chemical complexity of plastics", *Nature*, 643(8071), pp. 349-355.
- [7] BEAUMONT N.J. *et al.* (2025), "Cooperative agreement between countries of the North Atlantic Ocean reduces marine plastic pollution but with unequal economic benefits", *Commun Earth Environ* 6, 134.
- [8] HIRA A. *et al.* (2022), "Plastic waste mitigation strategies: A review of lessons from developing countries", *Journal of Developing Societies*, 38, pp. 336-359.
- [9] DEENEY M. *et al.* (2026) "Global health burdens of plastics: a lifecycle assessment model from 2016 to 2040", *Lancet Planet Health*, 10, 101406.
- [10] NYADJRO E. S. *et al.* (2026), "Gaps and pathways towards standardized, FAIR microplastics data harmonization: A systematic review", *Microplastics*, 5, 11 11.
- [11] WRIGHT S.L. & KELLY F.J. (2017), "Plastic and human health: a micro issue?", *Environmental science & technology*, 51, pp. 6634-6647.
- [12] COMPA M. *et al.* (2023), "Mapping microplastic overlap between marine compartments and biodiversity in a Mediterranean marine protected area", *Science of the Total Environment*, 892, 164584.
- [13] SYBERG K. *et al.* (2024), "Informing the plastic treaty negotiations on science - experiences from the scientists' coalition for an effective plastic treaty", *Microplastics and nanoplastics* 4, 14.

Conjuguer un océan sain et nourricier en Outre-mer : l'aquaculture dans et pour l'environnement en Polynésie française

Par Guillaume MITTA

Professeur des universités et membre du Centre Ifremer du Pacifique

Cristián J. MONACO

Biologiste marin, chercheur en écophysiologie et membre du Centre Ifremer de Bretagne

Simon Van WYNSBERGE

Écologue et membre du Centre Ifremer du Pacifique

& Thomas CAMUS

Ingénieur de recherche et membre du Centre Ifremer du Pacifique

La Polynésie française fait face à de grands défis, notamment l'autonomie alimentaire et l'impact des changements climatiques sur ses écosystèmes. Bien que 85 % des denrées alimentaires soient importées, l'aquaculture offre une solution durable pour améliorer la sécurité alimentaire tout en préservant l'environnement. En intensifiant les pressions sur les bassins versants, la surpêche et les pollutions menacent les coraux, entraînant une prolifération d'algues nuisibles. De nouvelles approches, telles que la régulation de la pêche et l'aquaculture, sont cruciales.

L'Ifremer développe des solutions comme l'aquaculture d'espèces de bas niveau trophique, notamment des bivalves, et la polyculture intégrée, permettant d'optimiser les ressources tout en réduisant les impacts. Des initiatives d'aquaculture restaurative visent à réensemencer les espèces herbivores, essentielles à la régénération des écosystèmes marins. Ces efforts visent à renforcer la résilience des écosystèmes polynésiens face aux défis contemporains.

Les socio-écosystèmes polynésiens sont confrontés à deux défis majeurs : le défi de l'autonomie alimentaire et le défi des changements globaux et locaux ; deux défis qui doivent être relevés de façon concertée. Avec 85 % des denrées alimentaires importées pour satisfaire les besoins de sa population, la Polynésie française doit améliorer la productivité de certaines activités du secteur primaire (pêche, agriculture, aquaculture) pour tendre vers plus d'autonomie alimentaire. Dans le même temps, il faudra préserver la santé des écosystèmes afin d'assurer la durabilité de ces activités dans le contexte des changements globaux et plus locaux auxquels les écosystèmes polynésiens sont particulièrement vulnérables. Sur les îles du Vent, notamment Tahiti et Moorea, la forte densité humaine et la diversité des activités (urbanisation, agriculture,

aquaculture, industrie, tourisme) intensifient les pressions sur des bassins versants volcaniques courts et escarpés, accélérant le transfert de sédiments, de nutriments et de contaminants vers les lagons (Neumann *et al.*, 2025). Dans le contexte du changement climatique, où de nombreuses espèces tropicales sont déjà à leurs limites thermiques, la combinaison des pollutions et des stress climatiques (réchauffement et pluies torrentielles) accroît le risque de dégradation écologique et de basculement fonctionnel des écosystèmes lagunaires. La surpêche, le réchauffement des eaux de surface (Hughes *et al.*, 2017) et les apports terrigènes (Donovan *et al.*, 2020) affaiblissent les coraux scléractiniaires et favorisent la prolifération de macroalgues exotiques envahissantes (Adam *et al.*, 2021), étouffant les récifs et parfois favorisant des épisodes de proliféra-

Comment conjuguer un océan sain et nourricier

tion d'algues toxiques affectant les consommateurs de produits du lagon (Chinain *et al.*, 2019).

Dans ce contexte, de nombreuses approches de conservation (telles que la mise en place de zones de pêche réglementée, « rhuï » en tahitien) et de restauration (bouturage corallien) sont mises en œuvre, mais les développements en aquaculture peuvent également contribuer à relever ces défis, grâce à des pratiques respectueuses de l'environnement (aquaculture d'espèces de bas niveau trophique ou aquaculture multi-trophique intégrée) ou même avec des développements au bénéfice de l'environnement (aquaculture restaurative). Ces approches sont développées par l'Ifremer en Polynésie française.

Aquaculture d'espèces de bas niveau trophique

À l'échelle planétaire, la nourriture bleue (issue de la pêche et de l'aquaculture) représente une opportunité pour augmenter la capacité de production tout en limitant les impacts environnementaux (Gephart *et al.*, 2016). Néanmoins, la surexploitation de la ressource halieutique a mené à la mise en place de quotas qui expliquent le plateau à 90 millions de tonnes de captures, stable depuis les années 1990 (FAO, 2024) ; le relais de la croissance de la production de nourriture bleue a depuis été assuré par l'aquaculture, qui est actuellement l'une des industries de production animale à la croissance la plus rapide (FAO, 2024). Ainsi, l'aquaculture contribue de manière significative à la sécurité alimentaire mondiale (Naylor *et al.*, 2021).

Les performances environnementales de ces productions de nourriture bleue par la pêche ou l'aquaculture ont été étudiées et l'aquaculture des bivalves présente l'un des meilleurs potentiels (Gephart *et al.*, 2021). En effet, ces espèces marines de bas niveau trophique ne nécessitent pas d'eau douce ni de farines animales pour être cultivées et elles limitent l'eutrophisation liée aux déchets qu'elles génèrent. En outre, les bivalves possèdent de grandes qualités nutritionnelles puisqu'ils sont des sources de nutriments riches en protéines, en acides gras insaturés et en oligoéléments (Golden *et al.*, 2021). Un grand avenir est donc promis au développement de l'aquaculture de ces espèces dans la perspective d'une réponse durable aux besoins en protéines de la population mondiale.

Pour ce qui est des mollusques bivalves, la majeure partie de la production mondiale correspond à des espèces tempérées, comme les palourdes ou les huîtres creuses *Magallana gigas*¹ et *C. virginica*² (FAO, 2024). L'aquaculture des huîtres de roche en zone tropicale (genre *Saccostrea*) n'a en revanche pas connu un tel essor. Pourtant, certaines de ces espèces présentent des croissances intéressantes pour l'aquaculture (Angell, 1986). Dans les régions tropicales, les différentes espèces d'huîtres de roche indigènes représentent donc une ressource sous-exploitée avec un

haut potentiel, surtout dans un contexte où l'intérêt pour les sources alimentaires locales et durables augmente (Naylor *et al.*, 2021).

En partenariat avec les services du territoire (direction des Ressources marines et délégation de la Recherche de Polynésie française) et une entreprise privée (Ostrea Tahiti), l'Ifremer développe la filière ostréicole en Polynésie française. Après avoir mis au point les protocoles zootechniques nécessaires à la production en écloserie des naissains de deux espèces locales (*Saccostrea echinata*³ et *S. cucullata*⁴ ; Monaco *et al.*, 2025), nous avons mis au point les protocoles nécessaires pour le grossissement dans différents environnements de culture (lagon et bassins terrestres) afin de limiter le développement des infestations par le ver *Polydora websteri*, un fléau pour le développement de l'ostréiculture en Polynésie française depuis des décennies. Le système innovant utilisé est appelé « marée solaire » (voir la Figure 1A) ; il permet par une exondation journalière de quelques heures, d'annihiler l'infestation par ce ver foreur de coquille sans affecter la survie des huîtres (manuscrit en préparation ; Monaco, 2026). La croissance de *S. echinata* n'est pas affectée par le traitement d'exondation, contrairement à *S. cucullata* (cf. Figure 1B). La taille commercialisable est atteinte après 14 mois de grossissement seulement, ce qui devrait permettre de voir cette filière émerger dans un avenir proche.

Aquaculture multitrophique intégrée

L'aquaculture multitrophique intégrée (AMTI) s'apparente à la polyculture, où plusieurs organismes sont élevés ensemble. En AMTI, plusieurs espèces appartenant à différents niveaux trophiques sont élevées de manière intégrée afin d'améliorer les performances d'élevage, de réduire les rejets et de fournir des services écosystémiques, tels que la bioremédiation. À Tahiti, l'Ifremer combine l'aquaculture de la crevette, qui génère des déchets azotés et phosphorés, avec l'aquaculture de l'huître de roche (voir la Figure 2). Les déchets produits par l'aquaculture de la crevette bleue (*Litopenaeus stylirostris*) transitent dans des bassins pour générer des blooms d'algues unicellulaires qui sont ensuite consommées par les huîtres. Cette circularité limite la quantité de nutriments rejetés au lagon, tout en permettant de développer une nouvelle activité économique et une nouvelle source de protéines pour la population polynésienne. Dans le même temps, les intrants de nutriments dans les lagons sont limités pour éviter de contribuer au développement des macroalgues sur les coraux.

Aquaculture restaurative

À Tahiti, la surpêche est un problème majeur qui, combinée à d'autres menaces, provoque une diminution de l'abondance de certaines espèces qui exercent un rôle important pour le bon fonctionnement de l'écosys-

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Magallana_gigas

² https://fr.wikipedia.org/wiki/Crassostrea_virginica

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Saccostrea_echinata

⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Saccostrea_cucullata

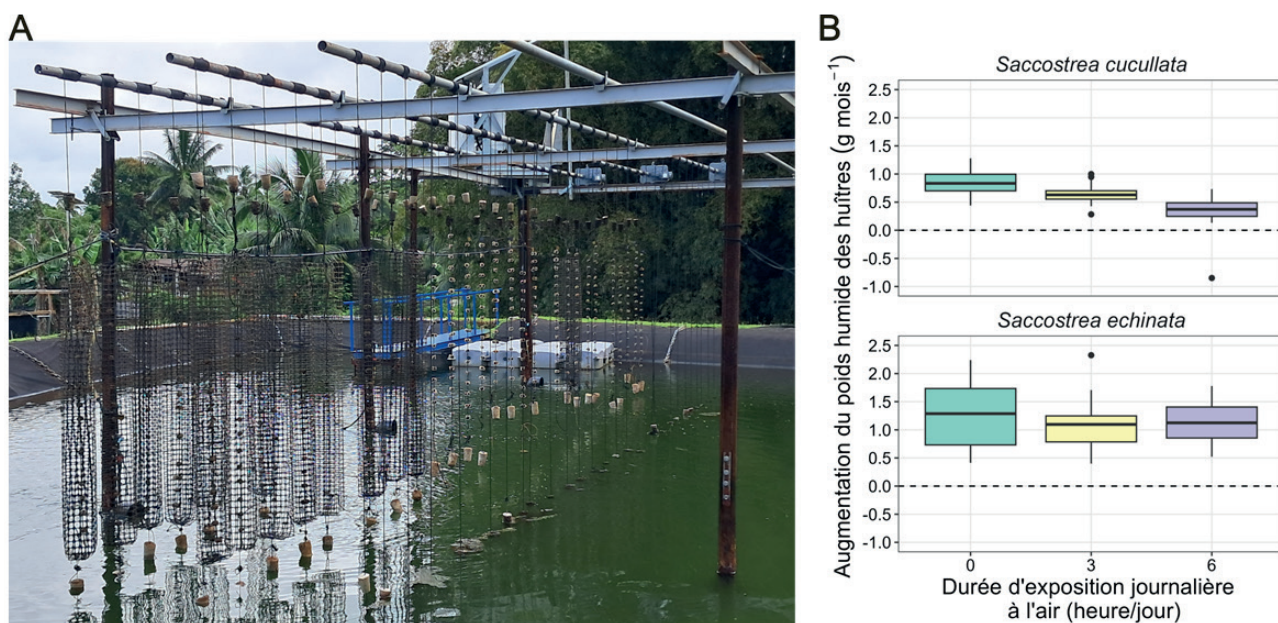


Figure 1 : Système d'exondation « Marée solaire » permettant de limiter l'infestation par le ver *Polydora websteri* (A). Trois heures d'exondation journalières permettent d'annihiler l'infestation sans altérer la croissance de *Saccostrea echinata* ; la croissance de *Saccostrea cucullata* est affectée par ce traitement d'exondation (B). Taux de croissance (changement du poids humide moyen individuel, g mois⁻¹) de *Saccostrea echinata* et *S. cucullata* au cours d'une expérience de croissance de deux mois en fonction du temps d'exondation (0, 3, et 6 h jour⁻¹). Paramètres des boîtes à moustaches : boîtes : 25^e et 75^e percentiles ; lignes horizontales : médianes ; moustaches : valeurs extrêmes (Source : Ifremer).



Figure 2 : Système d'AMTI entre la crevette bleue (*Litopenaeus stylirostris*) et les huîtres de roche (*Saccostrea* Sp) de la station Ifremer de Vairao (presqu'île de Tahiti). Les nutriments (azote et phosphate) sont utilisés pour générer des blooms algaux consommés par les huîtres de roche (Source : Ifremer).

tème. C'est le cas de certaines espèces de poissons et d'invertébrés herbivores qui jouent un rôle fondamental dans l'entretien et le maintien de l'écosystème corallien puisqu'ils consomment en permanence les jeunes pousses de macroalgues qui colonisent le récif. La raréfaction des espèces herbivores entraîne ainsi une croissance rapide et sans contrainte des macroalgues jusqu'à entraîner un basculement de l'écosystème (appelé "shift algal") : l'écosystème dominé par

les coraux devient un écosystème dominé par des algues et perd de sa biodiversité (Donovan *et al.*, 2023 ; Holbrook *et al.*, 2016).

Pour maintenir les herbivores en nombre suffisant pour réguler les populations algales, une première approche dite de conservation consiste à mettre en place des zones de pêche réglementées (appelées « rhuhi » en tahitien). Ces mesures permettent de réduire les

impacts de la pêche et de favoriser la reconstitution des stocks d'herbivores. Malheureusement, un nombre croissant d'études indique que ces mesures tendent à être insuffisantes tant les populations d'herbivores sont altérées (Altman-Kurosaki *et al.*, 2021). Une autre approche consiste donc à réensemencer dans le milieu des espèces herbivores autochtones produites en aquaculture afin de régénérer les stocks naturels. Ces réensemencements peuvent ralentir, voire annihiler la prolifération des algues dans les lagons les plus affectés (Neilson *et al.*, 2018). Ce type d'approche pourra être utilisé suite aux mortalités massives de coraux induites par des événements climatiques extrêmes (canicules marines, cyclones) ou par la prolifération d'acanthasters⁵ ; le réensemencement d'herbivores pourra ralentir la colonisation des coraux morts par les macroalgues et laisser plus de temps aux jeunes colonies de corail pour s'installer et coloniser l'espace libéré. Cette aquaculture restaurative se distingue de l'aquaculture classique de filière car elle n'a pas pour principal objectif de nourrir mais plutôt d'améliorer la santé et la résilience des écosystèmes (Alleway *et al.*, 2023).

Dans le Pacifique, des exemples d'aquaculture restaurative ont notamment été menés à Hawaii avec l'oursin *Tripneustes gratilla* pour lutter contre la prolifération d'algues invasives en baie de Kane'ohe, avec des résultats encourageants (Neilson *et al.*, 2018). Concernant la Polynésie française, un relâcher pilote, coordonné par la Direction des Ressources Marines (DRM) et la Coopérative des Aquaculteurs de la Polynésie fran-

çaise (CAPF) a eu lieu en 2017, au cours duquel deux mille *Siganus argenteus* (espèce de poisson lapin appelé communément « marava » à Tahiti) produits en écloserie ont été relâchés dans le lagon de la commune de Vairao, sur la presqu'île de Tahiti. Des études écologiques associées ont montré des résultats prometteurs avec une diminution significative de la couverture algale en quelques jours suite au réensemencement de ces herbivores.

Le centre Ifremer de Vairao travaille actuellement à maîtriser l'élevage de plusieurs espèces herbivores à des fins d'aquaculture restaurative : les oursins *Tripneustes gratilla* ainsi que le poisson lagonaire *S. argenteus*. Les premiers essais d'élevage d'oursins ont été menés avec succès (*cf.* Figure 3A, Camus, soumis) et les premiers élevages de *S. argenteus* sont en cours. La priorité est dans un premier temps de maîtriser l'ensemble du cycle biologique de ces espèces (conditionnement des géniteurs, pontes, élevage larvaire et grossissement) afin d'être en capacité de produire des dizaines de milliers d'individus de façon régulière et fiable. Après avoir établi les préférences trophiques de *Tripneustes gratilla*, un oursin particulièrement friand des espèces d'algues proliférantes ou envahissantes et considérées comme problématiques en Polynésie française (voir la Figure 3B, Camus, soumis), nous menons actuellement une expérience en cage lagonaire pour quantifier plus précisément l'influence de ces espèces sur le milieu (diversité et quantité d'algues broutées en fonction de la densité des individus relâchés). Dans les mois qui

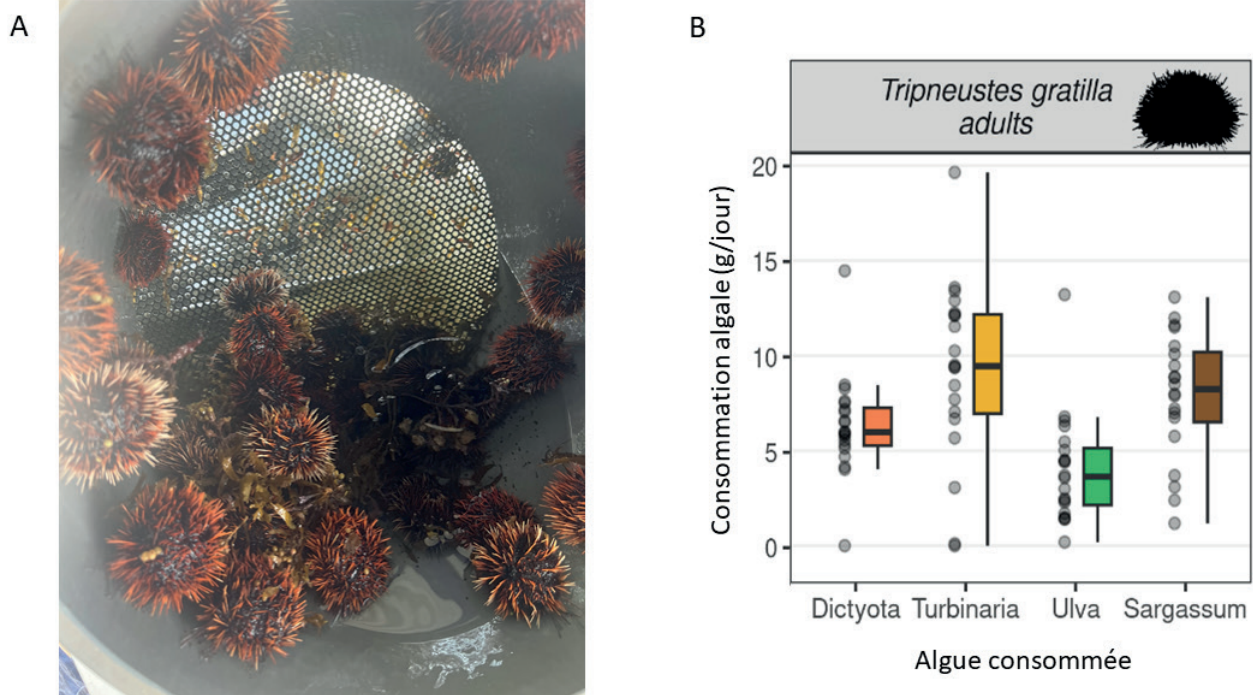


Figure 3 : (A) Juvéniles de *Tripneustes gratilla* produits à la station Ifremer de Vairao (B) Algues consommées par l'oursin *Tripneustes gratilla*. Les deux algues exotiques envahissantes des récifs polynésiens *Turbinaria ornata* et *Sargassum pacificum* sont bien consommées par les adultes de l'oursin *T. gratilla* (Source : Ifremer).

⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Acanthaster>

viennent, nous mènerons une série d'études suivant un certain nombre de précautions pour ne pas déstabiliser l'écosystème (Blankenship et Leber, 1995 ; Lorenzen *et al.*, 2010). Nous les mènerons sur un site dégradé, choisi conjointement avec la fédération des rhui de Tahiti. Les précautions à prendre incluent :

- de relâcher des animaux en bon état physiologique et sanitaire pour ne pas transmettre de maladies ou de parasites aux populations sauvages ;
- une gestion de la diversité génétique afin de ne pas affaiblir les populations sauvages ;
- la mise au point d'une méthode de marquage efficace permettant l'identification des individus relâchés ;
- la mise en place d'un suivi écologique complet qui comprendra des études pré- et post- relâcher.

L'objectif de ces travaux est, à terme, de faire émerger une filière d'aquaculture restaurative en Polynésie française, capable de produire les individus nécessaires pour répondre à la demande des comités de gestion des rhui, du territoire et des communes pour la mise en œuvre d'actions de réensemencement responsables et durables.

Bibliographie

ADAM T. C. *et al.* (2021), "Landscape-scale patterns of nutrient enrichment in a coral reef ecosystem: implications for coral to algae phase shifts", *Ecol Applications*, 31, 1, e2227.

ANGELL C.L. (1986), "The biology and culture of tropical oysters", International Center for Living Aquatic Resources Management, Manila, Philippines.

ALLEWAY H. K. *et al.* (2023), "Global principles for restorative aquaculture to foster aquaculture practices that benefit the environment", *Conservation Science and Practice*, 5(8), e12982.

ALTMAN-KUROSAKI N. T *et al.* (2021), "O 'ahu's marine protected areas have limited success in protecting coral reef herbivores", *Coral Reefs*, 40(2), pp. 305-322.

BLANKENSHIP H. L. & LEBER K. M. (1995), "A responsible approach to marine stock enhancement", In *American Fisheries Society Symposium*, Vol. 15, n°167475, pp. 167-175.

CHINAIN M. *et al.* (2019), "Ciguatera poisoning in French Polynesia: insights into the novel trends of an ancient disease", *New Microbes and New Infections*, 31, 100565.

DONOVAN M.K *et al.* (2020), "Nitrogen pollution interacts with heat stress to increase coral bleaching across the seascape", *PNAS*, 117(10), pp. 5351-5357.

DONOVAN M. K. *et al.* (2023), "Evidence for managing herbivores for reef resilience", *Proceedings of the Royal Society B*, 290 (2012), 20232101.

FAO (2024), "The State of World Fisheries and Aquaculture 2024 report".

GEPHART J. A. *et al.* (2016), "The environmental cost of subsistence: Optimizing diets to minimize footprints", *Science of The Total Environment*, 553, pp. 120-127.

GEPHART J. A. *et al.* (2021), "Environmental performance of Blue foods", *Nature*, 597, pp. 360-366.

GOLDEN C. D. *et al.* (2021), "Aquatic foods to nourish nations", *Nature*, 598(7880), pp. 315-320.

HOLBROOK S. J. *et al.* (2016), "Coral reef resilience, tipping points and the strength of herbivory", *Scientific reports*, 6(1), 35817.

HUGHES T. *et al.* (2017), "Global warming and recurrent mass bleaching of corals", *Nature*, 543, pp. 373-377.

JOSEPH M. M. (1998), "Mussel and Oyster Culture in the Tropics", In *Tropical Mariculture*, pp. 309-360.

LORENZEN K. *et al.* (2010), "Responsible approach to marine stock enhancement: an update", *Reviews in Fisheries Science*, 18(2), pp. 189-210.

MONACO C. J. *et al.* (2025), "Comparing the aquaculture potential of two tropical rock-oyster species in French Polynesia, *Saccostrea cucullata* and *S. echinata*", *Aquaculture*, 605, 742543.

MONACO C. J. *et al.* (2026), "Control of *Polydora* infestation by exondation and associated physiological impacts in tropical rock oysters from French Polynesia", Manuscript en préparation.

NAYLOR R. L. *et al.* (2021), "A 20-year retrospective review of global aquaculture", *Nature*, 591(7851), pp. 551-563.

NEILSON B. J. *et al.* (2018), "Herbivore biocontrol and manual removal successfully reduce invasive macroalgae on coral reefs", *PeerJ*, 6, e5332.

NEUMANN K. *et al.* (2025), "Land use shapes riverine nutrient and sediment concentrations on Moorea, French Polynesia", *Sci Rep*, 15, 27948.

L'aquaculture à la croisée des chemins : produire durablement dans un monde qui fluctue

Par Tristan MACQUET et Benjamin DENJEAN

Ingénieurs centraliens spécialisés dans les sciences de l'environnement et co-fondateurs de « Le Paysan Marin »

L'aquaculture mondiale croît, mais sur un modèle fragile : carnivores nourris aux farines de poisson, systèmes mono-espèce, dépendance aux intrants. La France, sans toujours en avoir conscience, a fait un autre choix : 70 % de sa production aquacole repose sur des espèces qui filtrent l'eau, ne consomment aucun aliment exogène et s'intègrent aux écosystèmes côtiers. Ce modèle n'est pas un retard. C'est une avance. Une avance que confirment la thermodynamique des réseaux trophiques, les données d'empreinte carbone, et les 30 ans de recherche comparée sur la transition agroécologique à terre. Cet article explore ce que signifie produire durablement dans un monde qui fluctue : pourquoi l'aquaculture de bas niveau trophique est structurellement plus robuste, comment l'AMTI a fait ses preuves à grande échelle en Chine, et pourquoi la France, si elle ne structure pas rapidement ses filières émergentes, risque de laisser s'éroder silencieusement une longueur d'avance que des décennies ne suffisent pas à construire.

Introduction

Le monde mange de plus en plus de produits aquatiques. Depuis 60 ans, leur consommation par personne a plus que doublé, passant de 9,9 kg dans les années 1960 à 20,5 kg en 2019 (FAO, 2022). Protéines complètes, oméga-3, iode, sélénium : les produits de la mer concentrent des nutriments essentiels que peu d'autres aliments peuvent revendiquer. Pour des milliards de personnes sur les côtes tropicales et équatoriales, ils sont le socle alimentaire.

La pêche ne peut plus répondre seule. Ses captures mondiales stagnent depuis 30 ans au prix d'une érosion de la capacité de renouvellement des stocks. L'aquaculture a pris le relais : elle représente désormais plus de la moitié de la production mondiale d'animaux aquatiques, et devra continuer à croître pour nourrir 10 milliards d'humains d'ici 2050. Mais toutes les aquacultures ne se valent pas face aux turbulences qui s'accumulent. La question n'est plus seulement de savoir combien produire, mais comment produire des systèmes capables de tenir dans un monde qui fluctue. Et la France, sans toujours en avoir conscience, dispose d'une longueur d'avance pour y répondre.

Une croissance mondiale qui masque des fragilités

Près de 90 % de la production aquacole mondiale est concentrée en Asie. L'Europe n'en représente que 4 %, et la France affiche une production en recul : 145 000 tonnes en 2023 contre 186 000 en 2008, avec un tissu d'entreprises qui s'érode. Le Haut-

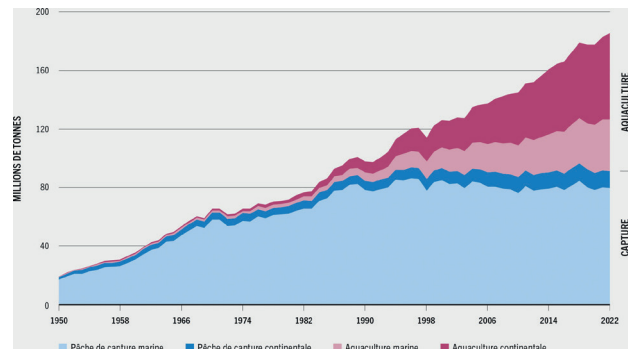


Figure 1 : Déjà 30 ans que la pêche a atteint son maximum tandis que l'aquaculture se développe tant en mer qu'à terre (Source : FAO).

Commissariat au Plan chiffrait en 2023 le déficit commercial sur les produits de la mer à 5,7 milliards d'euros, dont plus d'1 milliard rien que pour le saumon. Seulement 30 % des besoins nationaux sont couverts par la production nationale.

Le modèle dominant repose sur des espèces nourries (saumons, crevettes, bars, daurades en monoculture intensive) dont la production dépend de farines et d'huiles de poisson issues de la pêche minotière. Environ 15 millions de tonnes de poissons sauvages sont mobilisées chaque année (Cottrell *et al.*, 2020), dans un contexte où les stocks fourrages ont atteint leur rendement maximum. Ces systèmes mono-espèce, mono-site, mono-produit sont structurellement vulnérables.

rables : le premier aléa sanitaire, énergétique ou climatique révèle leur fragilité.

La France fait figure d'exception. Sa filière repose à 70 % sur la conchyliculture (huîtres, moules, palourdes), des espèces extractives sans apport alimentaire exogène, qui filtrent l'eau et s'intègrent aux écosystèmes côtiers. Premier producteur européen d'huîtres, deuxième producteur aquacole de l'UE – derrière une Espagne elle-même spécialisée dans les moules –, la filière a généré 929 millions d'euros en 2023, portés à plus de 50 % par l'ostréiculture (Agreste, 2025). Pourtant, cette filière est encore trop souvent vécue comme en retard par rapport aux aquacultures intensives de carnivores. Cette lecture est non seulement erronée, elle est dangereuse.

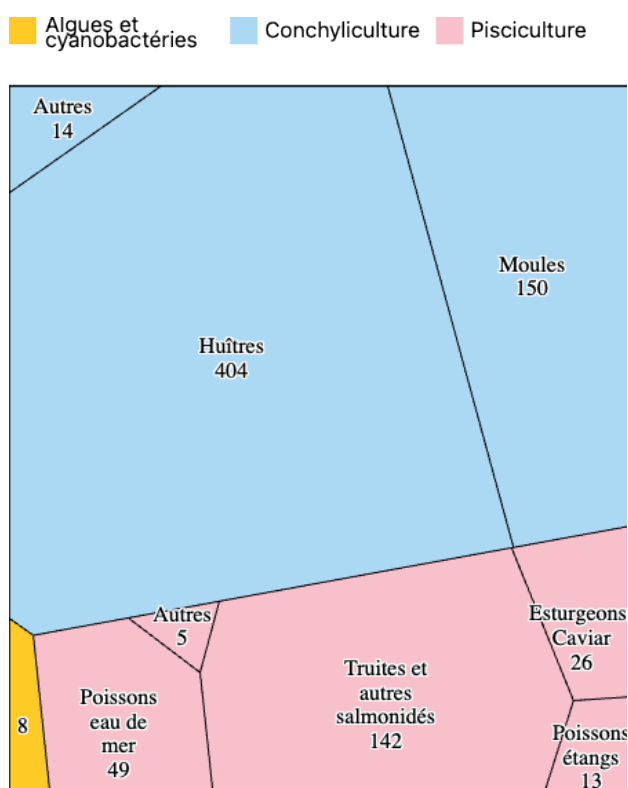


Figure 2 : La part majoritaire de la conchyliculture dans l'aquaculture et surtout la mariculture française (Source : Agreste 2021).

Le choix de société derrière chaque assiette

Le diagnostic du Haut-Commissariat au Plan est juste : quatre poissons d'élevage consommés sur cinq en France sont importés. Mais la réponse ne peut pas être de produire en France ce que d'autres nations font depuis des décennies avec des moyens et des économies d'échelle sans commune mesure avec les nôtres.

La France consomme 260 000 tonnes de saumon par an et n'en produit que 500. Le bar et la daurade, premières productions de pisciculture marine française, sont eux aussi des prédateurs carnivores aux mêmes intrants minotiers : seules 34 entreprises produisent

5 700 tonnes en mer (Agreste, 2025). Les contraintes réglementaires et les coûts opérationnels poussent les projets vers des systèmes RAS¹ en milieu contrôlé, limitant les espèces viables aux plus gros marchés existants, tous carnivores.

La thermodynamique des réseaux trophiques est implacable. À chaque niveau de la chaîne alimentaire, environ 90 % de l'énergie est dissipée : seuls 10 % passent au niveau supérieur (Lindeman, 1942). Élever un prédateur carnivore revient à mobiliser dix fois plus de ressources que d'élever l'espèce dont il se nourrit. Les systèmes RAS ajoutent à cette inefficience une dépendance énergétique de 5 à 30 kWh par kilo produit (Fiso *et al.*, 2024). Ces tensions sont inscrites dans les lois de la physique. Les améliorer à la marge, c'est optimiser là où un changement de paradigme est nécessaire.

L'écart d'empreinte carbone traduit concrètement cet abîme : une moule sur filière émet 107 kg CO₂ équivalent par tonne produite, contre environ 6 000 kg pour un poisson d'élevage (BIM, Seafood Carbon Report, 2023). Ces chiffres traduisent la différence entre un système qui capte l'énergie du milieu et un système qui en consomme.

Alors que sept des limites planétaires sont déjà dépassées, que l'aquaculture intensive de carnivores touche à au moins cinq d'entre elles, et qu'émergent de nouveaux cadres internationaux tels que l'économie bleue régénérative (UICN, 2024), la question n'est pas de savoir si la France peut produire plus de carnivores marins, mais si elle doit y consacrer son foncier littoral limité et sa politique aquacole, ou si elle doit amplifier un modèle qui valorise ses atouts naturels.

La France a déjà les cartes en main

La France cumule trois atouts que peu de nations peuvent revendiquer simultanément : une expertise technique et scientifique internationalement reconnue sur les sujets aquacoles, des façades maritimes diversifiées (Manche, Atlantique, Méditerranée) constituant une réserve de robustesse face aux aléas, et une tradition et acceptation sociale des produits relevant de l'aquaculture de bas niveau trophique que d'autres nations construisent laborieusement.

L'aquaculture de bas niveau trophique (coquillages, algues, échinodermes, poissons herbivores) relève des productions les plus vertueuses pour la production de protéines à très faible impact. L'ostréiculture et la mytiliculture sont largement présentes sur tous nos littoraux métropolitains et dans nos cultures alimentaires, là où elles peinent à émerger chez nos voisins : en Norvège, les mollusques ne représentent que 1 647 tonnes pour 137 sites, soit moins de 0,1 % de la production aquacole nationale (Eurofish, 2024), tandis que la Baltique et le Portugal disposent de filières balbutiantes ou tournées vers l'export sans ancrage culinaire domestique comparable.

¹ Le *Recirculating Aquaculture System* (RAS), ou système aquacole en recirculation, est un mode d'élevage en milieu contrôlé où l'eau est filtrée et réutilisée en boucle.

Ce bas niveau trophique est particulièrement bien adapté à des approches de polyculture. Bivalves filtreurs, macroalgues, brouteurs (ormeaux, oursins), détritivores (holothuries) et espèces omnivores comme le mullet peuvent s'articuler en systèmes circulaires. La baie de Sanggou, en Chine, offre la démonstration la plus documentée de cette Aquaculture Multitrophique Intégrée (AMTI) à grande échelle. Sur 133 km² du Shandong, huîtres, kelp, pétoncles, ormeaux et concombres de mer coexistent depuis 30 ans sans dégrader l'état écologique de la baie, produisant des services de régulation deux à trois fois supérieurs à la monoculture, avec une valeur commerciale quatre à cinq fois plus élevée à l'hectare (Fang *et al.*, 2017).



Figure 3 : Holothuries, oursins et gastéropodes sont pêchés en plongée sous les filières mêlant laminaires, bivalves et ormeaux (Photo : Tristan Macquet, Baie de Sanggou, 2025).

Ces approches restent à des échelles bien moindres en France (baies de Tamaris et de Quiberon, France Haliotis à Plouguerneau, La Ferme des Pieds Mouillés sur l'île de Ré), mais elles trouveront dans la diversité des territoires littoraux français un terreau de déploiement certainement plus propice qu'ailleurs.

Le parallèle avec la transition agricole à terre

Cette évolution des pratiques a son exact équivalent dans l'agriculture terrestre, déjà en cours depuis 30 ans. L'agroécologie au sens large (association céréales-légumineuses, agroforesterie, réduction des intrants, valorisation des auxiliaires naturels) progresse dans toutes les politiques agricoles. Ces pratiques ne sont pas des concessions à l'environnement : 30 ans de recherche comparée montrent qu'elles réduisent significativement la dépendance aux intrants extérieurs (Snapp *et al.*, Nature Food, 2023 ; Meynard *et al.*, INRAE, 2022) et améliorent la résilience aux aléas climatiques. Ce basculement s'est produit parce que les limites du modèle intensif monoculture ont fini par devenir visibles : effondrement de la biodiversité des sols, coût croissant des intrants, vulnérabilité aux sécheresses. L'aquaculture intensive de carnivores est au même stade que l'agriculture des années 1980 : performante dans un environnement stable, fragile dès que l'environnement change. Les aquacultures res-

taurtrices, multitrophiques, de bas niveau trophique, proposent des approches « aquaécologiques » comparables et adaptables à chaque territoire.

Cette évolution s'adosse à une opportunité supplémentaire : l'élévation inéluctable du niveau de la mer et la salinisation croissante des espaces littoraux transformeront des zones agricoles en zones saumâtres. Un milliard d'hectares de la surface terrestre mondiale, soit environ 7 %, sont touchés par ce phénomène (INRAE, 2023). Seules des pratiques hybrides agri-aquacoles pourront maintenir des activités productives sur ces territoires en mutation.

Quand pêche, aquaculture et restauration convergent

Cette logique brouille les frontières entre activités perçues comme mutuellement exclusives. Le modèle japonais Urchinomics en est l'illustration : des oursins en surnombre broutent les forêts de laminaires jusqu'à en faire des landes nues. Urchinomics pratique non seulement une pêche sélective et un engraissement en bassin, mais valorise également la préservation des forêts de laminaires, *via* des crédits carbone bleus reconnus par le gouvernement japonais. Cette action hybride de garde-forestier sous-marin s'exporte aujourd'hui au nord de l'Europe.

Les approches de restauration marine s'appuyant sur ces mécanismes de crédits carbone, nutriments ou biodiversité sont des solutions « sans regret » (Gattuso, 2018) qui favorisent la santé des écosystèmes et apportent de nombreux co-bénéfices. En France, le réensemencement des gisements de coquilles Saint-Jacques en rade de Brest et les programmes de res-



Figure 4 : Visite du Conservatoire du Littoral à La Ferme des Pieds Mouillés sur l'île de Ré pour évaluer la compatibilité des approches AMTI en marais avec les enjeux de conservation de biodiversité (Photo : Tristan Macquet, 2026).

tauration d'herbiers marins ou de récifs d'huîtres plates empruntent déjà les outils de l'aquaculture sans en avoir le nom.

Changer ce qu'on mange et comment on vend

Aucune transition des systèmes de production ne sera durable sans évolution des habitudes alimentaires et des chaînes de valeur. Sur nos criées, des espèces abondantes et nutritives (roussette, tacaud, mullet, araignée de mer) peinent à trouver preneur. Les marchés alimentaires se construisent pourtant activement : l'invention du sushi de saumon dans les années 1980, sous l'impulsion de la filière norvégienne, le prouve, et ils pourraient se reconstruire autrement pour peu qu'un véritable travail de filière soit engagé.

Les arguments santé liés aux oméga-3 à longue chaîne, aujourd'hui attachés aux poissons gras d'import, pourraient s'appliquer en priorité aux espèces de bas niveau trophique élevées en France, avec des concentrations parfois supérieures dans des huîtres issues de co-culture avec des macroalgues (Institut Agro Rennes-Angers, 2025).

Les leviers de la transformation alimentaire et de la restauration collective pourraient s'activer autour de ces protéines bas carbone pour adosser nos consommations à une forme de souveraineté alimentaire.

La Stratégie nationale pour l'alimentation, la nutrition et le climat 2025-2030, publiée en février 2026, fixe parmi ses 20 objectifs la diversification des sources de protéines vers des espèces à faible impact et fait de la restauration collective un levier prioritaire. C'est une avancée réelle. Mais sans étiquetage lisible sur les modes de production et sans accompagnement structuré des circuits courts, la recommandation restera lettre morte pour les produits de la mer. Plus encore, l'histoire et la psychologie sociale nous montrent que les changements de comportements de consommation pour raisons collectives sont faisables, mais nécessitent des stratégies d'activation fines (Lewin, 1947). Le déploiement de cette diversification implique ainsi une coordination collective qui aille au-delà de l'émergence de chaînes de valeur, mais mobilise l'ensemble des acteurs publics et privés aux côtés de la société civile.

Conclusion

Il n'existe pas de modèle universel. Chaque territoire littoral, ou « merritoire », a ses espèces, ses usages, ses contraintes : c'est à cette échelle que pêche, aquaculture et restauration écologique doivent être pensées ensemble. La transition se construit en associant producteurs, chercheurs et communautés côtières. Un système aquatique durable est robuste et adaptable : robuste face aux perturbations climatiques, sanitaires, économiques ; adaptable en s'appuyant sur la diversité biologique et territoriale. Les systèmes qui traversent les crises ne sont pas ceux qui ont maximisé leur performance dans un environnement stable, mais ceux qui ont conservé la capacité de répondre à l'inattendu.

La dépendance actuelle aux importations aquacoles n'est pas une fatalité : c'est le résultat du choix implicite de ne pas avoir donné à nos filières littorales les moyens de leur ambition. Dans un monde où les enjeux de souveraineté alimentaire redeviennent centraux et où les chaînes longues montrent leur fragilité à chaque crise, réduire cette dépendance par le bas niveau trophique et la polyculture aquacole est à la fois le chemin le plus cohérent avec les atouts français et le plus robuste face aux chocs à venir.

La France n'a pas de retard aquacole. Elle a une longueur d'avance qu'elle n'a pas encore décidé d'exploiter pleinement.

Références

- AGRESTE (2025), « Enquête annuelle de la production aquacole 2023 », ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire.
- BIM (2023), "Seafood Carbon Report, Bord Iascaigh Mhara", cité dans : EMPA (2024), *Manifesto for the sustainable development of the european shellfish sector*.
- COTTRELL R. S. *et al.* (2020), "Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030", *Nature Food*, 1, pp. 301-308.
- EMPA (2024), "Manifesto for the sustainable development of the european shellfish sector", octobre 2024.
- FANG J. *et al.* (2017), *Training module for Integrated Multitrophic Aquaculture in PR China*, FAO/NACA.
- FAO (2022), "The state of world fisheries and aquaculture 2022", Rome.
- FISO A. *et al.* (2024), "Energy consumption of recirculating aquaculture systems: a review of 22 commercial systems", *Aquacultural Engineering*, 107, 102451.
- GATTUSO J.-P. *et al.* (2018), "Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems", *Frontiers in Marine Science*, 5, 337.
- HAUT-COMMISSARIAT AU PLAN (2023), « Le développement de l'aquaculture : un enjeu de souveraineté alimentaire », *Stratégie*, 16, novembre 2023.
- LE GOUVELLO M. *et al.* – UICN (2024), « Vers une économie bleue régénérative », UICN France.
- LEWIN K. (1947), "Group decision and social change", in *Readings in Social Psychology*, T. Newcomb and E. Hartley (Eds.), pp. 340-344, New York: Holt
- LINDEMAN R. L. (1942), "The trophic-dynamic aspect of ecology", *Ecology*, 23, 4, pp. 399-417.
- MEYNARD J.-M. *et al.* – INRAE (2022), "Diversification of cropping systems: an agroecological lever for reducing pesticide use", *Field Crops Research*, INRAE.
- MINISTÈRES DE LA SANTÉ, DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE L'AGRICULTURE (2026), « Stratégie nationale pour l'alimentation, la nutrition et le climat 2025-2030 », février 2026.
- REGNIER É. – INRAE (2023), « Sols menacés », Peut-on encore sauver les sols ?, dossier thématique INRAE, publié le 27 juin 2023, consulté le 15 mai 2026, <https://www.inrae.fr/dossiers/peut-encore-sauver-sols/sols-menaces>
- RICHARDSON K. *et al.* (2023), "Earth beyond six of nine planetary boundaries", *Science Advances*, 9, 37, eadh2458.
- SNAPP S. *et al.* (2023), "Farming systems diversification benefits ecosystem services and climate adaptation: a meta-analysis", *Nature Food*, 4, pp. 229-240.

Chalutage et Aires marines protégées : comprendre les multiples enjeux, proposer des solutions concertées

Par Clara ULRICH
Éditrice

Le 11 avril 2025, l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) publiait un rapport de réflexion scientifique sur un sujet aussi complexe que médiatisé : « Faut-il interdire le chalutage dans les aires marines protégées (AMP) ? ». Cette question, au cœur des tensions entre préservation de la biodiversité et maintien des activités économiques, cristallise les attentes de la société civile, les préoccupations des scientifiques et les enjeux des professionnels de la mer.

Alors que la France accueillait la 3^e Conférence des Nations Unies sur l'Océan, ce débat a eu, et a toujours aujourd'hui, une résonance particulière. Le rapport croise les expertises d'un collectif de 30 scientifiques de l'Ifremer, issus de disciplines variées (écologie, économie, halieutique), pour éclairer le débat public. Le travail met en lumière une réalité nuancée : les AMP ne sont pas des entités homogènes, et le chalutage, dont l'impact écologique est attesté, ne peut être abordé sans considérer ses dimensions économiques et sociales, ainsi que les risques liés au déplacement d'effort de pêche en cas d'interdictions dans certaines zones.

Cet article propose une synthèse vulgarisée des analyses présentées dans ce rapport (Ulrich *et al.*, 2025), qui se décline autour de plusieurs points de réflexion : le rôle et la diversité des AMP en France et dans le monde, les impacts du chalutage sur les écosystèmes marins, y compris dans les zones protégées, les bénéfices et risques d'une interdiction du chalutage dans les AMP, ainsi que des pistes pour une gestion équilibrée, conciliant protection de la biodiversité et durabilité des activités de pêche. Cette note a mobilisé une vaste littérature scientifique, dont les références, non reprises ici, sont à trouver dans le rapport original.

Remerciements à tous les auteurs de l'Ifremer du rapport original :

Thébaud O., Vaz S., Pelletier D. (Eds) ; Billet N., Blanchard F., Boussarie G., Boyé A., Certain G., Cayocca F., Delmas L., Drogou M., Faillettaz R., Guyader O., Harlay X., Laffargue P., Laurans M., Leblond E., Le Bourdonnec P., Lehuta S., Macher C., Mahe K., Mahevas S., Menot L., Millot J., Pérez Agúndez J. A., Savina-Rolland M., Simon J., Tessier E., Vermard Y., Vincent B. (contributeurs) ; ainsi que Sanchez W. et Danet J.

Les Aires marines protégées : des espaces de biodiversité sous pression

Une Aire marine protégée (AMP) est une zone maritime délimitée où des mesures spécifiques sont mises en place pour protéger la biodiversité marine et gérer durablement les activités humaines. Ces aires sont créées dans l'objectif de préserver les écosystèmes

marins, les habitats et/ou les espèces qui y vivent, tout en permettant souvent certaines activités économiques et récréatives de manière contrôlée. La France compte aujourd'hui 565 AMP, couvrant 33 % de sa zone économique exclusive, avec une large diversité de tailles et de localisations, allant des zones côtières aux espaces maritimes au large. La cartographie des AMP en France est complexe, avec onze grandes catégories définies par le Code de l'environnement, incluant – entre autres – les parcs naturels marins, les parcs nationaux,

les réserves naturelles, les sites Natura 2000 ayant des parties maritimes ou les zones de conservation halieutique.

Les objectifs de conservation de ces AMP varient également : certaines visent à protéger les habitats de fond de mer, d'autres à préserver les oiseaux ou les mammifères marins. Les AMP sont ainsi généralement choisies pour couvrir des zones d'intérêt, du fait de leur importance pour le maintien des populations de différentes espèces sensibles (mammifères marins, tels que les dauphins et les baleines, oiseaux marins ou migrateurs) ou la protection de certains habitats rares et fragiles peuplés d'espèces sédentaires comme les coraux, les éponges et les herbiers marins, qui sont souvent vulnérables aux activités humaines.

Les AMP abritent également une grande diversité d'espèces associées, mobiles ou sédentaires. Parmi les espèces mobiles les fréquentant, on peut trouver divers poissons d'intérêt halieutique qui occupent des aires de répartition beaucoup plus larges que celles des AMP, en se déplaçant tout au long de leur cycle de vie. Ils utilisent des habitats spécifiques à différents stades, tels que les frayères (zones de reproduction des adultes, essentiellement en pleine mer), et les nourrices côtières pour les juvéniles. La mobilité des espèces entre les zones protégées et les zones non protégées est alors un facteur clé de l'efficacité des AMP pour la gestion et la pérennité de ces espèces exploitées. Par ailleurs, le phénomène de "spillover" ou débordement, par lequel les poissons protégés dans une AMP contribuent au renouvellement des populations à l'extérieur, peut bénéficier à la pêche locale. Cependant, l'efficacité de ce débordement dépend notamment de l'intensité de l'effort de pêche aux frontières des AMP.

Les niveaux de protection au sein des AMP dépendent de leur nature. Le terme « protégée » peut ainsi prêter à confusion, car toutes les AMP ne bénéficient pas du même niveau de protection. Certaines zones sont des réserves intégrales où toute activité humaine est interdite, mais la très large majorité des surfaces délimitées en AMP permettent des usages régulés. Cette situation émane de la tentative historique d'utiliser les AMP, et notamment les parcs marins, comme des « zones atelier » pour conjuguer la préservation des écosystèmes marins et l'exploitation durable des ressources marines. La gouvernance de ces aires implique souvent une collaboration multipartite entre les acteurs locaux (organisations professionnelles, collectivités locales, etc.), les services de l'État et les associations de protection de l'environnement. Mais les réglementations et leur mise en œuvre varient considérablement d'une AMP à l'autre, selon la nature des enjeux (par exemple le nombre et l'intensité des activités présentes sur le territoire) et les moyens financiers et humains qui sont dédiés à la gestion.

On constate pourtant aujourd'hui que ce système n'a en majorité pas permis d'atteindre des objectifs de protection tangibles et ambitieux. Certains habitats sensibles, dont la protection a été requise depuis quelques décennies, n'ont en réalité pas été véritablement protégés, au vu des activités humaines (y compris des activités autres que la pêche) qui y sont encore pratiquées.

Ces habitats subissent encore des pressions multiples et cumulées et sont aussi fragilisés par la pollution et le changement climatique, si bien qu'un niveau important de dégradation est observé aujourd'hui pour nombre d'entre eux.

Le chalutage : une technique efficace, mais controversée

Le chalutage est une méthode de pêche qui consiste à traîner un filet, appelé chalut, sur le fond marin ou en pleine eau pour capturer des poissons et autres organismes marins. Cette technique est largement utilisée en raison de son efficacité pour capturer de grandes quantités de poissons en une seule opération. En France, le chalutage et la drague représentent environ la moitié de la pêche hexagonale, tant en volume qu'en valeur des débarquements, et jouent un rôle crucial dans l'approvisionnement des marchés locaux, nationaux et européens. La technique, en fournissant des volumes importants de produits de la mer, assure une stabilité économique aux criées, qui sont des éléments clés de la filière pêche.

Le chalutage est cependant très énergivore et a des impacts environnementaux significatifs, notamment sur les espèces et habitats sensibles. Les fonds marins peuvent être érodés, et les captures accessoires de juvéniles et d'espèces non ciblées peuvent perturber le renouvellement des populations. Les impacts des engins de pêche sur les fonds marins dépendent des caractéristiques des navires et des engins, de l'intensité de l'activité de pêche (ou effort de pêche), et de la nature des fonds, des habitats et/ou des communautés. Par exemple, un chalut à perche gréé avec de lourdes chaînes aura un impact différent de celui d'un chalut de fond de petite taille. De même, un habitat régulièrement perturbé par la houle ou les courants sera plus résilient à l'abrasion générée par le chalutage qu'un habitat se développant sur des fonds naturellement peu dérangés. Ainsi, un seul passage de chalut peut modifier profondément et durablement des habitats fragiles comme les récifs coralliens, le maërl et les herbiers, ou plus généralement les zones à écosystèmes marins vulnérables (EMV). Ces impacts ne se limitent cependant pas aux AMP et leur réduction à court terme doit être pensée globalement pour préserver la biodiversité marine. Le chalutage est déjà interdit dans la bande côtière des 3 milles (bien qu'il fasse l'objet de différentes dérogations), et au-delà de 800 m de profondeur.

Dans les AMP, les documents de gestion définissent quelles zones de chaque aire protégée peuvent être chalutées ou non, selon les enjeux de protection d'habitats ou d'espèces sensibles. De fait, une part significative de l'activité de chalutage et de dragage se déroule encore dans les AMP en France. Pour les navires de plus de 12 m, pour lesquels on dispose de données précises de géolocalisation, des études estiment qu'au moins un tiers de l'effort de pêche et un quart de la valeur des débarquements français des engins traînants de fond (chaluts et dragues) seraient réalisés dans des AMP. Des analyses plus ciblées des données du Système d'Information Halieutique (SIH) de l'Ifremer

montrent toutefois une grande variabilité entre les flottilles : certaines dépendent fortement des AMP, tandis que d'autres y sont moins présentes. De plus, il reste encore difficile d'évaluer l'effort de pêche dans les AMP des petits chalutiers et dragueurs côtiers de moins de 12 m, non soumis aux mêmes obligations réglementaires (absence de données de géolocalisation fine des navires). Leurs possibilités de report d'effort en dehors des AMP sont par ailleurs plus réduites que pour les navires de plus grande autonomie.

La fréquence du chalutage dans les AMP varie donc considérablement, et cette diversité de situations illustre l'importance d'une approche différenciée de la pêche dans les AMP.

Interdire le chalutage en AMP : quels bénéfices, quels risques ?

L'interdiction du chalutage dans les AMP aurait des conséquences écologiques et socio-économiques significatives, surtout dans les zones les plus intensément exploitées aujourd'hui. Écologiquement, les habitats marins de ces AMP bénéficieraient d'une réduction de la pression de pêche, favorisant la régénération des écosystèmes, l'augmentation de la biodiversité ou le rétablissement de fonctions naturelles essentielles. Les zones protégées verraient une amélioration de la qualité des fonds marins, une réduction de l'érosion et une meilleure protection des espèces sensibles comme les coraux et les herbiers.

Un enjeu majeur est que l'interdiction pourrait entraîner, non pas une réduction de l'effort de pêche total, mais seulement son déplacement vers d'autres zones, augmentant la pression sur les écosystèmes non protégés. Si ce report n'est pas bien géré, il pourrait accentuer les impacts négatifs sur des zones non protégées, parfois fragiles, notamment celles peu exploitées auparavant. Le remplacement du chalutage par d'autres techniques de pêche, comme les filets et les lignes, pourrait poser de nouveaux défis, notamment pour la protection des mammifères marins et des oiseaux, plus impactés par ces méthodes.

Sur un plan économique et social, l'interdiction affecterait également les communautés de pêcheurs. Les conflits d'usage seraient susceptibles de se renforcer, car l'espace maritime disponible pour la pêche se réduit déjà avec l'augmentation de l'utilisation des espaces maritimes pour d'autres activités comme les parcs éoliens en mer. La mise en œuvre d'une telle interdiction exigerait alors des investissements majeurs dans la concertation et la gouvernance pour assurer le respect et le suivi des réglementations. Une planification à long terme serait essentielle pour intégrer ces changements dans une réflexion plus large sur les transitions techniques, énergétiques et spatiales du secteur de la pêche.

Vers des approches concertées et ambitieuses

En matière de gestion des activités de pêche dans les AMP, une approche différenciée mais intégrée semble ainsi justifiée. Cependant, la prise en compte de ces enjeux, cruciale dans la définition et la mise en œuvre des réglementations, conduit parfois à une dilution des ambitions d'origine ; C'est ce qui conduit à l'appel actuel à augmenter les surfaces en protection stricte au sein de ces zones. Pour cela, il est essentiel d'identifier les zones où les bénéfices écologiques seraient les plus marqués, c'est-à-dire celles permettant de maximiser les effets positifs des AMP (en se concentrant particulièrement sur les habitats sensibles et les stades de vie critiques des espèces marines), tout en limitant les risques d'impacts négatifs dus au report d'effort de pêche. En parallèle, il est crucial d'analyser les effets économiques et sociaux des fermetures de zones pour la pêche, en prenant en compte les flottilles pratiquant le chalut et celles qui ne le pratiquent pas. Les impacts sur l'emploi en mer et à terre, sur les filières amont (production d'équipements pour les navires de pêche) et aval (transformation et commercialisation des produits de la pêche) dans les territoires devront également être évalués. De même, il faut considérer les impacts sur les marchés et la consommation des produits de la mer, voire plus largement l'impact des, et sur les, systèmes alimentaires de substitution si les volumes de captures baissent. Une autre proposition réside dans l'intégration de mécanismes incitatifs pour les pêcheurs. Par exemple, l'accès aux AMP pourrait être conditionné à l'adoption de technologies compatibles avec les objectifs de conservation et de contrôle, qui permettraient de renforcer la conformité aux règles tout en soutenant l'adoption de pratiques plus durables.

En considérant plus largement les bassins maritimes dans leur ensemble, différents outils scientifiques de planification spatiale optimisée peuvent être mobilisés pour examiner des propositions. Dans une approche inversée, des analyses cherchent par exemple à identifier des zones « cœurs » prioritaires pour la pêche, pour protéger en priorité les autres espaces moins intensément exploités. Il a par exemple été estimé qu'en moyenne, dans les eaux européennes de l'Atlantique Nord-Est, environ 90 % de la valeur des débarquements des navires de plus de 12 m utilisant des engins traînants de fond proviennent de moins de 50 % des surfaces de pêche. Cela pourrait offrir une marge de manœuvre pour l'optimisation des zones protégées, tout en limitant les pertes économiques et les impacts environnementaux.

Conclusion

La gestion des AMP est presque toujours conçue de manière à inclure l'ensemble des parties prenantes dans un processus de concertation avec les professionnels de la pêche, les scientifiques, les associations environnementales et les autorités compétentes. Les discussions sur la protection forte, plus prégnantes aujourd'hui, doivent continuer à se développer dans

ce cadre. Les outils scientifiques de spatialisation fine permettent d'évaluer des scénarios de gestion incluant des AMP et des régulations spatiales des activités de pêche, tout en prenant en compte d'éventuels reports d'effort de pêche, ce qui permet d'estimer l'atteinte de différents objectifs et d'explicitier les compromis. Il est important de continuer à développer ces approches et à les utiliser dans les processus décisionnels et les dialogues avec les acteurs locaux, pour rendre les mesures plus compréhensibles et équitables.

Le débat actuel constitue ainsi une occasion de repenser en profondeur la gestion des espaces maritimes. L'objectif ultime reste de concilier préservation de la biodiversité et maintien d'une pêche durable, mais dans une optique plus ambitieuse pour des résultats plus tangibles.

Référence

ULRICH C., THEBAUD O., VAZ S. & PELLETIER D. (2025), « Note de réflexion : Chalutage et Aires marines protégées : Mobiliser les connaissances et expertises scientifiques pour trouver des solutions ambitieuses et concertées », <https://archimer.ifremer.fr/doc/00948/105947/>

Mieux comprendre les captures accidentelles de dauphins dans le golfe de Gascogne pour pouvoir les réduire

Par Clara ULRICH, Jérôme SPITZ & Pierre PETITGAS

Éditeurs

À la fin de l'année 2025, les partenaires du projet scientifique Delmoges (DELphinus MOUvements GESTion) ont publié les résultats finaux de cet ambitieux projet, qui avait pour objectifs d'étudier, pour la première fois, les mécanismes à l'origine de l'augmentation des captures accidentelles de dauphins communs dans le golfe de Gascogne depuis 2016 et de proposer des pistes pour mieux concilier pêche et conservation des dauphins communs.

Ce projet interdisciplinaire a mobilisé des écologues, des halieutes, des modélisateurs, des économistes et des chercheurs en sciences de gestion. Il a généré un grand nombre de connaissances nouvelles, permettant de dresser un panorama scientifique complet et d'actualiser notre compréhension des interactions entre les dauphins communs et leur environnement (facteurs physiques, polluants, proies) et avec les activités de pêche.

Cet article propose une synthèse vulgarisée des principaux résultats obtenus par le projet. Les résultats techniques sont détaillés dans plus de 45 livrables disponibles publiquement¹, et des fiches de synthèse infographiées sont également disponibles dans le rapport final (Authier *et al.*, 2025) et le policy brief (Ulrich *et al.*, 2025). Ces différents travaux ont mobilisé une vaste littérature scientifique, dont les références, non reprises ici, peuvent être consultées dans les rapports originaux.

Remerciements aux contributeurs :

Les principaux contributeurs du projet sont, par ordre alphabétique :

Matthieu AUTHIER, Tiphaine CHOUVELON, Camille DESLIAS, Paula MENDEZ-FERNANDEZ, Hélène PELTIER, Marion PILLET, Vincent RIDOUX, Olivier Van CANNEYT et Julien VIAU (La Rochelle Université) ; Germain BOUSSARIE, Mathieu BREVET, Mathieu DORAY, Laurent DUBROCA, Robin FAILLETTAZ, Sophie GOURGUET et Sigrid LEHUTA (Ifremer) ; Amélia VIRICEL-PANTE (Université de Bretagne occidentale).

Ont également contribué à cet article : Julie DANET et Wilfried SANCHEZ (Ifremer).

Croiser différents modes d'observation pour une vision écosystémique du golfe de Gascogne

De nombreuses campagnes en mer ont été menées pendant les trois années du projet, pour étudier les dauphins communs et leurs proies dans le golfe

de Gascogne. Au cours des hivers 2023 et 2024, des survols aériens ont permis de réaliser près de 1 000 observations (individus ou groupes) de mammifères marins, dont une majorité de dauphins communs. Ces survols ont montré que la distribution des dauphins n'est pas homogène dans le temps et dans l'espace en hiver, avec notamment une capacité à se concentrer ponctuellement dans certaines zones sur le plateau du golfe de Gascogne, et avec une dynamique variable selon les années. En parallèle, un

¹ Voir aussi <https://delmoges.recherche.univ-lr.fr/>

navire autonome de surface (drone) équipé de capteurs acoustiques et environnementaux a parcouru 1 600 km sur le plateau continental entre Royan et Noirmoutier. Lors des deux hivers consécutifs, il a détecté dans la même zone des activités acoustiques élevées de dauphins et de leurs proies, les petits poissons pélagiques (sardines, anchois et sprats) près des côtes. Les proies formaient parfois des tapis denses très près du fond, ce qui pourrait attirer les dauphins dans la zone d'action des filets de pêche posés sur le fond.

Enfin, des campagnes en mer sur un voilier, réalisées en juin 2022 et 2023, ont permis de prélever des échantillons de tissus biologiques de dauphins communs se trouvant loin des côtes (biopsies de peau et de lard), pour des analyses génomiques et des marqueurs d'alimentation, ainsi que des échantillons d'eau de mer pour des analyses d'ADN environnemental. Alors que tous les dauphins échantillonnés dans le golfe de Gascogne partagent la même signature génétique, les travaux sur ces marqueurs ont révélé des différences significatives entre les dauphins échantillonnés au large et ceux observés plus près des côtes, où le risque de captures accidentelles est plus élevé. Ces résultats indiquent que les dauphins communs résidant sur le plateau continental du golfe de Gascogne vivent en majorité séparés de ceux fréquentant la zone océanique, bien que des échanges puissent exister. Par ailleurs, des analyses de contaminants chimiques effectuées sur les animaux échoués ont montré que les animaux avec des traces de capture par les engins de pêche étaient globalement en meilleure santé au moment de leur mort que les animaux morts d'autres causes (*i.e.* sans traces de capture).

Comprendre les modifications du paysage alimentaire des dauphins

Le projet s'est attaché à comprendre pourquoi les échouages et les captures accidentelles ont augmenté depuis 2016 (Ulrich *et al.*, 2024). L'étude des contenus stomacaux des dauphins communs échoués a révélé que les petits poissons pélagiques gras, tels que la sardine et l'anchois, demeurent leurs proies principales. Quelques évolutions sont observées, reflétant les changements dans les stocks halieutiques ainsi qu'une augmentation des espèces secondaires côtières, à l'image du sprat et des lançons, davantage consommées depuis 2017. La majorité des estomacs des animaux échoués présentant des traces de capture accidentelle contenait des restes frais, indiquant que l'animal était en train de se nourrir au moment de la mort, et principalement de sardines et d'anchois. Les espèces directement ciblées par la pêche au filet (merlu, sole...) étaient absentes des proies fraîchement ingérées, excluant ainsi l'hypothèse que les dauphins se nourrissent de poissons capturés dans les engins de pêche au moment de leur mort.

Parallèlement, l'analyse croisée des résultats des projets de recherche Delmoges et Defipel (DEveloppement d'une approche de gestion intégrée de la Filière petits

PELagiques française, Huret *et al.*, 2024) a mis en évidence des effets en cascade dans les chaînes alimentaires de l'écosystème du golfe de Gascogne, en lien avec le changement climatique : augmentation de la température de surface de presque 0,8°C au cours des 20 dernières années, diminution de la production de microalgues (phytoplancton), diminution de la taille du zooplancton qui se nourrit de micro-algues et de la taille des petits poissons pélagiques qui se nourrissent de zooplancton, changements de distribution géographique... Cette cascade écosystémique serait à l'origine du rapprochement vers les côtes, observé chez le dauphin commun notamment en hiver, pour se nourrir des concentrations côtières de petits poissons pélagiques. Les dauphins sont au final plus présents dans une zone où la pression de pêche est plus élevée, ce qui a probablement contribué à l'augmentation récente des captures de dauphins communs. Ainsi, les transformations de l'écosystème, sous l'effet notamment du changement climatique, pourraient être à l'origine de modifications dans la distribution des dauphins communs pour s'alimenter. Ces changements ont des conséquences directes sur leur vulnérabilité, en particulier face aux engins de pêche dans les zones côtières en hiver.

Cartographier le risque pour prévenir les captures accidentelles

Grâce à une analyse fine des données de géolocalisation de navires de plus de 12 mètres, les scientifiques ont estimé l'effort de pêche de filets posés au fond par ces navires en calculant la longueur et le temps d'immersion. Cette mesure est plus adéquate que la méthode traditionnelle basée sur les jours ou heures en mer des fileyeurs. Des caractéristiques techniques expliquant une partie de la variabilité des captures de dauphins observées dans les filets en hiver entre 2016 et 2023 ont alors été identifiées grâce aux données collectées par les observateurs à bord et par les caméras installées sur des navires. La longueur du filet, le temps d'immersion, et la quantité de phytoplancton sont ainsi des facteurs clés associés à un nombre de captures plus élevé, tout comme la saisonnalité et les stratégies de pêche.

En croisant toutes les données disponibles sur les dauphins, leurs proies, l'effort de pêche et les captures observées, il est possible d'élaborer des cartes de risque de capture, à différentes échelles d'espace et de temps. Le risque y est défini comme la probabilité de présence dans la même zone d'engins de pêche et de dauphins, ce qui constitue un aléa auquel les dauphins sont vulnérables à des degrés divers en fonction de différents facteurs écologiques (liés aux proies et à leur distribution), techniques (caractéristiques des filets) ou encore environnementaux.

Des cartes de risque de capture ont notamment été produites pour la zone entre la Gironde et la Loire en février 2023 (voir la Figure 1), période à laquelle un maximum de données étaient disponibles. Le croise-

ment des données de distribution des dauphins, de leurs proies et de l'effort de pêche des filets a permis d'identifier *a posteriori* les zones où le risque de capture de dauphin commun devait être le plus élevé. Si elle était alimentée à l'avenir par des flux de telles données collectées en routine, cette cartographie fine du risque de capture de dauphins communs pourrait ouvrir la voie à des mesures de gestion ciblées, adaptées au contexte local. Cette approche intégrée est essentielle pour concilier protection de la biodiversité et pérennité des activités économiques, en France comme en Europe.

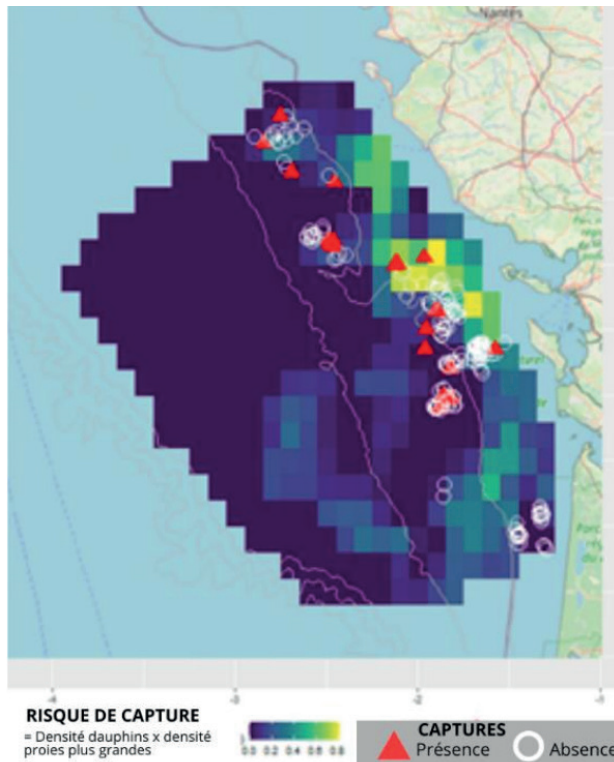


Figure 1 : Carte rétrospective du risque et des positions des opérations de pêche (pour les navires de plus de 12 mètres) avec (rouge) et sans (blanc) capture de dauphin commun basée sur les données de février 2023. Le risque de capture accidentelle est le plus fort dans les carrés aux teintes vertes/jaunes (Source : Doray *et al.*, 2025 (Livrabable Delmoges L2.3.4)).

Les travaux du projet Delmoges confirment la complexité de la problématique des captures d'espèces protégées par les engins de pêche, qui nécessite de prendre en compte une diversité d'acteurs et de multiples dimensions (économiques, sociales, technologiques, environnementales, réglementaires).

Une série d'enquêtes, menées à la fois en ligne et par entretiens, a permis de mieux comprendre la diversité de perceptions des acteurs (pêcheurs, filière aval – criées, poissonniers, mareyeurs... –, ONG, décideurs, gestionnaires, grand public...) vis-à-vis des mesures envisageables pour réduire les captures accidentelles : balises acoustiques, changements de stratégies de pêche, fermetures temporaires de zones à risque, mesures incitatives...

Chaque mesure implique des compromis différents entre efficacité écologique attendue, contraintes opérationnelles (mise en œuvre et suivi) et impacts socio-économiques potentiels. Pour l'heure, aucune des mesures pouvant être mises en œuvre à court terme ne semble pleinement satisfaisante pour l'ensemble des acteurs. Toutefois, des propositions s'expriment dans l'enquête, portées par certains acteurs interrogés : elles consistent en des fermetures ciblées de zones de pêche, en fonction des cycles biologiques des espèces cibles (sole, bar, lieu) et qui pourraient bénéficier à tout l'écosystème du golfe de Gascogne. Des ajustements de quotas, des aides ciblées ou une modulation de l'effort de pêche, sous réserve d'un cadre réglementaire et technique adapté, ont également été proposés par certains acteurs. À plus long terme, certaines de ces propositions pourraient aussi répondre à des enjeux structurels de la filière, comme la réduction de la pénibilité du métier et l'amélioration de son attractivité, à condition de s'inscrire dans une démarche de gestion concertée et dans une valorisation accrue des pratiques de pêche durables.

Partager ces connaissances sur le risque de capture accidentelle et les compromis possibles pour les réduire pourra continuer à alimenter le dialogue entre les services de l'État et les parties prenantes, afin de mettre en place de futures mesures de gestion pertinentes et acceptables.

Le projet Delmoges a ainsi permis de formuler, d'évaluer et de croiser des hypothèses scientifiques multiples, et de discuter des options de remédiation. Outre l'amélioration des connaissances sur les processus de capture accidentelle des dauphins communs du golfe de Gascogne, ce projet peut aussi fournir un cadre méthodologique pour appréhender des problématiques similaires concernant d'autres espèces, ou dans d'autres pêcheries et régions.

Synthèse

Les principaux résultats du projet Delmoges, tels que résumés dans les fiches infographiées (Ulrich *et al.*, 2025) sont ainsi :

- Causes de l'augmentation des captures depuis 2016 : Delmoges a montré que les proies des dauphins (les petits poissons pélagiques) sont concentrées près des côtes, les attirant dans les zones de pêche hivernales. Ces dauphins, globalement en bonne santé au moment de leur mort, sont capturés lorsqu'ils chassent activement les anchois et sardines.
- Mesure et cartographie du risque de captures : Delmoges a cartographié le risque de capture des dauphins en croisant données de pêche et observations en mer, pour les zones, périodes et types de pêche pour lesquelles ces données étaient disponibles. Ce travail révèle que la cooccurrence géographique entre les dauphins, leurs proies et les engins de pêche est variable, mais parfois importante. Certaines zones côtières semblent particulièrement à risque en hiver lorsque certains types de proies y sont présents.

- Mesures de gestion et de remédiation : enjeux d'efficacité et d'acceptabilité. Depuis 2024, la France a instauré des fermetures temporaires de zones de pêche pour les engins à risque. Cette mesure, efficace à court terme mais coûteuse sur le plan économique et social, appelle à discuter et évaluer des options alternatives. Delmoges a apporté des perspectives nouvelles à travers différents scénarios, incluant des approches technologiques, des limitations et changements de stratégies de pêche, et des mesures incitatives.

Deux autres fiches infographiées sont disponibles, l'une sur le contexte historique des captures de dauphins depuis la fin du XIX^e siècle, et l'autre sur les résultats de l'enquête conduite en 2024 sur la perception du problème et des possibles mesures de remédiation par une diversité d'acteurs.

Piloté par La Rochelle Université, le CNRS et l'Ifremer, en partenariat avec l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) et le Comité national des pêches maritimes et des élevages marins (CNPMM), le projet Delmoges a été cofinancé par la direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB), la direction générale des Affaires maritimes, de la Pêche et de l'Aquaculture (DGAMPA), France Filière Pêche (FFP) et les établissements de recherche impliqués.

Références

- AUTHIER M., CHOUVELON T., DORAY M., DUBROCA L., FAILLETTAZ R., GOURGUET S., LEHUTA S., PELTIER H., PETITGAS P., PILLET M., RIDOUX V., SPITZ J., ULRICH C. & VIRICIEL-PANTE A. (2026), « DELMOGES. DELphinus Mouvements GESTion », Rapport final, Livrable L.5.2. <https://archimer.ifremer.fr/doc/01003/111447/>
- DORAY M., BOUSSARIE G., VAN CANNEYT O., CLOÂTRE T. & PETITGAS P. (2025), « DELMOGES. Rapport sur la cartographie du risque de capture accidentelle de dauphin commun à fine échelle dans le centre du Golfe de Gascogne en février 2023 », Livrable L234, <https://doi.org/10.13155/109276>
- HURET M., LEHUTA S., ROMAGNAN J.-B., DORAY M., DAURES F. & TRAVERS-TROLET M. (2024), « Rapport DEFIPEL. Développement d'une approche de gestion intégrée de la filière petits pélagiques française », RBE/HALGO/LBH-2024-02, Ifremer, <https://doi.org/10.13155/104256>
- ULRICH C., PELTIER H., SPITZ J. & PETITGAS P. (2024), « Que sait-on sur les captures accidentelles de dauphins dans le golfe de Gascogne, et pourquoi est-il si difficile de les éviter ? », *The Conversation*, 223890 (5 p.), <https://archimer.ifremer.fr/doc/00883/99485/>
- ULRICH C., PETITGAS P. & SPITZ J. (2025), « DELMOGES. Policy brief : Comprendre et réduire les captures accidentelles de dauphins communs dans le golfe de Gascogne », Livrable L.5.6, <https://doi.org/10.13155/113877>

Les enjeux de connaissance des grands fonds marins

Par Valérie CHAVAGNAC

Co-pilote du PEPR Grands fonds marins, géochimiste, GET, CNRS, Toulouse

Pierre-Yves LE MEUR

Co-pilote du PEPR Grands fonds marins, anthropologue, SENS, IRD, Nouméa

Pierre-Marie SARRADIN

Co-pilote du PEPR Grands fonds marins, chimiste, BEEP, Ifremer, Plouzané

Clémence COTTEN

Responsable FAIRisation des données du pôle ODATIS de l'Infrastructure de Recherche DataTerra, Ifremer, Plouzané

Céline DÉGREMONT

cheffe de programme du PEPR Grands fonds marins, Direction Scientifique, Ifremer, Plouzané

Bérengère HUSSON

Biologiste et chargée de mission scientifique au PEPR Grands fonds marins, Géo-Océan, CNRS, Plouzané

Violette LARRIEU

Politiste et chargée de mission scientifique au PEPR Grands fonds marins, IRD, Univ Brest, Ifremer, CNRS, AMURE, IUEM, F-29280, Plouzané

& Yacine MOUFID

Ingénieur gestion des données du PEPR Grands Fonds Marins, pôle ODATIS de l'Infrastructure de Recherche DataTerra, Ifremer, Plouzané

L'océan profond a longtemps été considéré comme inaccessible, obscur et sans vie. Le PEPR « Grands Fonds Marins : savoirs, usages, communs » (France 2030, Défi 10 Grands Fonds Marins) vise à acquérir des connaissances sur les grands fonds marins, définis ici de façon large du plancher océanique et son substratum à toute la colonne d'eau, considérés comme lieux d'échanges d'énergie, de matière, et comme habitats pour les organismes marins.

L'interdépendance entre la terre solide, la colonne d'eau et la biosphère est abordée *via* les différents enjeux scientifiques de l'océan que sont la pompe biologique de carbone et son lien avec la régulation du climat, la biodiversité et sa résilience dans une pluralité de paysages sous-marins, ainsi que les transferts d'énergie et leurs impacts sur l'environnement abiotique et biotique.

Cette production de connaissances fondamentales n'opère pas en apesanteur sociale et prend en compte les enjeux sociaux, environnementaux, politiques et économiques qui travaillent les espaces océaniques. Elle réexamine nos savoirs et capacités d'action, nos droits, devoirs et responsabilités vis-à-vis de ces milieux.

Introduction

Les grands fonds marins¹ ont longtemps été perçus, en raison de leur inaccessibilité, comme une plaine abyssale isolée, calme, tranquille et quasi désertique, préservée des pressions anthropiques. Le développement de la pêche au cachalot au début du XIX^e siècle puis la pose de câbles télégraphiques sous-marins dans la seconde moitié du XIX^e siècle vont donner une nouvelle image des abysses : plus profonds, plus accidentés, plus riches en vie animale que prévu. De grandes expéditions scientifiques vont être lancées, comme celle, emblématique, du *HMS Challenger* (1872-1876), à l'origine de la découverte des nodules polymétalliques (Rozwadowski, 2005, 2018). L'invention des sous-marins et leur usage militaire grandissant lors des deux guerres mondiales du XX^e siècle et pendant la guerre froide vont parachever ce « tournant volumétrique » (Oreskes, 2021 ; Squire, 2022).

Après des décennies d'expéditions uniquement menées depuis la surface, c'est seulement vers la fin des années 1950 que le développement des submersibles a permis de débiter une nouvelle phase d'exploration, au travers d'un lien organique entre intérêts militaires, géopolitiques et scientifiques (Oreskes, Martinez-Riuz, Hamblin...). Ainsi, la plongée du Trieste en 1960 dans la fosse des Mariannes a battu un record de profondeur (- 10 916 m), suivie par le développement de submersibles scientifiques maniables permettant des observations visuelles directes des paysages sous-marins et la prise d'échantillons (e.g., l'*Alvin* aux USA en 1964, le *Nautilus* français en 1984). Cette capacité d'exploration reste cependant encore limitée puisque seulement cinq ou six pays disposent de ce type de moyens d'exploration, dont la France avec sa Très Grande Infrastructure de Recherche, la Flotte Océanographique Française (cf. article par Maximilien Simon et Jan Operderbecke dans ce numéro). Mais encore aujourd'hui, la majeure partie des abysses demeure inexplorée. Seulement 26,1 % ont été cartographiés par sondeur de coque, apportant une carte bathymétrique à résolution adéquate pour la navigation *in situ* d'un engin sous-marin. Pour autant, moins de 5 % des fonds marins ont été explorés jusqu'à aujourd'hui, et moins de 0,001 % a été observé directement par l'œil humain (Bell *et al.*, 2025).

De nos jours, cette exploration dépasse largement l'enjeu des connaissances des seuls abysses. En effet, chaque expédition scientifique améliore notre connaissance de ces milieux extrêmes mais pose aussi de nombreuses questions sur leur rôle dans le fonctionnement global de l'océan, sur leur résilience face aux changements climatiques et face à leurs usages variés, existants ou potentiels. Aujourd'hui, l'intérêt grandissant des États et des acteurs industriels internationaux

pour l'exploitation des ressources des grands fonds place ces environnements au cœur d'enjeux géopolitiques, économiques et environnementaux mondiaux, ce qui donne une place politique centrale à la question des savoirs (Sander *et al.*, 2025).

La raison d'être du PEPR « Grands fonds marins : savoirs, usages, communs »² réside dans la production de savoirs. Cette production de connaissances fondamentales n'opère pas en apesanteur sociale, elle prend en compte les enjeux sociaux, environnementaux, politiques et économiques qui travaillent les espaces océaniques et sont remodelés par ces nouveaux savoirs.

Les sciences de toutes disciplines apportent chaque année de nouvelles connaissances et rendent peu à peu visible l'invisible, alimentant dans le même mouvement l'ensemble des enjeux politiques, économiques ou environnementaux évoqués plus haut. Cet article présente un état des lieux non exhaustif des savoirs, des ignorances (dominantes) et des questions de recherche portant sur les grands fonds marins, avec pour ambition de poser les premières pierres d'un dialogue interdisciplinaire.

Les sciences sociales à l'épreuve des GFM (et réciproquement)

L'intégration des grands fonds marins (GFM) dans les sociétés humaines s'est faite tardivement, à partir du XIX^e siècle, sous la forme de nouveaux usages qui ont progressivement fait prendre conscience de la grande profondeur, des reliefs et de la diversité de la vie des abysses. Il s'agissait de la chasse au cachalot, puis de la pose de câbles télégraphiques sous-marins et de l'invention des sous-marins, dont le rôle militaire est devenu prégnant pendant la Première Guerre mondiale, mais surtout lors de la Seconde Guerre mondiale, puis pendant guerre froide. Auparavant, les océans étaient utilisés comme un lieu de passage, permettant de transporter des humains et des marchandises d'un point A à un point B, de livrer des batailles navales et aussi de prélever des poissons et d'autres produits de la mer. On peut donc parler d'un tournant volumétrique, encore incomplet, puisque les politiques publiques océaniques sont encore souvent des projections vers l'espace marin de schémas imaginés pour les espaces terrestres. Les forces motrices de ce tournant sont donc largement économiques et politiques, dans un contexte marqué par le colonialisme et l'impérialisme d'origine principalement européenne puis états-unienne. L'exploration scientifique des grands fonds marins va se nourrir des connaissances produites par leurs premiers usagers (baleiniers, câbliers) tandis que les connaissances produites par les premières expéditions océanographiques, comme celle de HMS Challenger, vont rapidement susciter des convoitises (les nodules polymétalliques sont découverts au cours de cette campagne qui s'est étendue sur plusieurs années).

¹ Même si elle n'a pas d'assise en droit de la mer, une définition commune de l'océan profond se base sur la limite de pénétration de la lumière, entre 200 et 1 000 mètres de profondeur (appelée aussi zone crépusculaire), où se terminent les eaux peu profondes du plateau continental. En tenant compte de ces limites, les grands fonds marins représentent 65 % de la surface de la Terre et 95 % de son espace habitable ou biosphère. La profondeur moyenne de l'océan est de 3 800 mètres et la profondeur maximale atteint 11 000 mètres dans la fosse des Mariannes.

² Ce travail bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du plan d'investissement France 2030 (ANR-24-PEFM-0001).

En d'autres termes, la connaissance des GFM va directement se placer au cœur d'intérêts économiques et géopolitiques et cette configuration n'ira qu'en s'approfondissant au cours des XX^e et XXI^e siècles. Cela tient à la place centrale des médiations technoscientifiques dans l'accès aux abysses. Lorsqu'elles rendent visibles et font remonter à la surface des entités et des connaissances inédites, elles génèrent dans le même mouvement des enjeux économiques, politiques, sociaux, environnementaux, culturels, etc.

S'ouvre ici un champ de recherche immense pour les sciences sociales, entre histoire des océans, de leur exploration et de leurs usages, études des sciences et des technologies visant la connaissance de ces espaces, économie politique et environnementale des grands fonds, géopolitique, droit et pluralité des souverainetés océaniques et des savoirs associés.

Un premier champ de recherche concerne les représentations, connaissances et usages des grands fonds, marqués par une pluralité des perspectives. L'accès humain aux grands fonds est donc indirect. L'observation sur terre d'unités rocheuses océaniques anciennes (ophiolites), enchâssées dans les chaînes de montagnes, est une manière détournée de visualiser l'ancien fond marin. L'accès au fond marin actuel impose des médiations scientifiques et techniques sophistiquées. Par ailleurs, ces espaces ne sont pas nécessairement ignorés par les populations autochtones. Les peuples océaniques ont par exemple, au fil des siècles, développé une connaissance directe et indirecte des espaces océaniques, des courants, du climat et des reliefs sous-marins. La volonté de gouverner les océans génère également des savoirs spécifiques (professionnels, juridiques, administratifs, cartographiques, etc.) qui influencent la représentation et l'usage des océans. Enfin, les océans sont l'objet de diverses représentations littéraires et artistiques qui façonnent les imaginaires et jouent un rôle souvent sous-estimé sur les projections de tous les acteurs – politiques, scientifiques, économiques – sur ces espaces largement méconnus. Pour aborder ces enjeux, il est nécessaire de conceptualiser les grands fonds dans le contexte plus large du monde marin, et de les relier aux espaces côtiers et terrestres, *via* différentes approches mettant l'accent sur les formes de connectivité, les flux et les mobilités, dont l'identification et l'analyse nécessitent des regards disciplinaires pluriels.

Second champ de recherche, l'économie politique et environnementale des grands fonds marins s'inscrit dans une série de tensions, entre exploitation et préservation, commun et appropriation, économie bleue et durabilité. La communauté scientifique ne cesse d'alerter sur la dégradation de la santé des océans et ses conséquences sur l'habitabilité : diminution de la biodiversité, pollutions plastique et chimique, gyres de déchets, marées noires, etc. L'acidification des océans, l'augmentation des vagues de chaleur marines et la désoxygénation résultent du changement climatique, tandis que les éruptions volcaniques sous-marines peuvent représenter des menaces telluriques. La dégradation de la santé des océans pose des risques

pour les vies humaines et non humaines. Dans le même temps, les espaces océaniques apparaissent comme la dernière frontière de l'expansion géopolitique et capitaliste et de la ruée vers les ressources (pêche et autres ressources biologiques, exploitation minière, etc.). La transition énergétique et les externalités négatives des industries extractives terrestres sont instrumentalisées par certains acteurs économiques pour justifier cette ruée. Le discours sur l'économie bleue porte ainsi une contradiction entre la préoccupation de préservation des environnements et écosystèmes abyssaux et la volonté d'exploiter leurs ressources selon une logique capitaliste, combinant extractivisme et recherche du profit économique.

Le troisième champ de recherche intéressant les sciences sociales porte sur la gouvernance multi-échelle des grands fonds. Il s'agit ici d'identifier les cadres juridiques, les arènes, institutions et acteurs aux niveaux international, régional, national et local, leurs interactions et temporalités multiples, et le rôle des savoirs en général et de la science en particulier. Le droit de la mer a construit des frontières spatiales entre des zones soumises à différents régimes de gouvernance. C'est le cas des ZEE, espaces dans lesquels l'État côtier exerce des droits souverains et certaines compétences fonctionnelles, sans disposer d'une pleine souveraineté territoriale ; des plateaux continentaux, y compris au-delà de 200 milles marins le cas échéant, sur lesquels l'État côtier exerce des droits souverains aux fins d'exploration et d'exploitation des ressources naturelles du sol et du sous-sol marins ; et des zones situées au-delà des juridictions nationales, comprenant la haute mer et la Zone internationale des fonds marins. La Zone internationale des fonds marins est régie par un régime spécifique établi par la Convention des Nations unies sur le droit de la mer et administré par l'Autorité internationale des Fonds marins (AIFM). En plus de cette organisation spatiale des océans, il existe des outils, espaces et mécanismes de gestion spécifiques liés à des enjeux de protection ou d'exploitation : aires marines protégées, zones de pêche, contrats d'exploration ou d'exploitation des ressources minérales dans la Zone internationale des fonds marins, outils de gestion par zone et aires marines protégées susceptibles d'être établies au titre de l'Accord BBNJ dans les zones situées au-delà des juridictions nationales, etc. Enfin, les populations riveraines des océans ont développé, sur le long terme, des formes de gouvernance des espaces marins pouvant inclure des domaines profonds éloignés. Face à la fragmentation spatiale, institutionnelle, sectorielle et politique de la gouvernance des grands fonds marins, leur intégration dans les espaces marins dans leur ensemble et en lien avec la terre constitue un enjeu majeur, à caractériser et analyser, en tenant compte des enjeux géopolitiques, combinant sécurité et souveraineté, et des risques de conflits ou de tensions internationales. À cet égard, des enseignements peuvent être tirés de la comparaison avec le statut juridique de l'Antarctique.

Outre les sciences sociales, de nombreuses disciplines étudient les grands fonds marins. La suite de cet article les présente de façon non exhaustive.

Des grands fonds marins en interaction avec la surface et les sociétés humaines

Plonger dans l'océan profond, c'est quitter les eaux de surface, lumineuses, poissonneuses, où les sociétés humaines transportent, pêchent et voyagent pour s'enfoncer vers un milieu méconnu, obscur et froid. La pression hydrostatique augmente d'environ 1 bar tous les 10 mètres parcourus. En zone hadale (~ 11 000 m sous le niveau de la mer), la pression atteint 1 100 kg/cm² (soit l'équivalent du poids d'une girafe sur l'ongle de votre pouce).

En surface, le processus de photosynthèse océanique (production de matière organique par les micro-algues) est à la base des chaînes alimentaires marines et capte environ 10 % à 15 % du dioxyde de carbone atmosphérique (CO₂), gaz à effet de serre principal responsable du changement climatique avec le méthane. Cette transformation du CO₂ en carbone organique permet son assimilation par les êtres vivants et ainsi son transfert vers le fond des océans via la chaîne alimentaire, dans un processus majeur de la régulation du climat appelé la « pompe biologique du carbone ». Les espèces marines dites « mésopélagiques » (vivant entre 200 et 1 000 m de profondeur) migrent quotidiennement vers les eaux de surface pour profiter de cette source d'énergie. Cette migration diurne, le plus grand déplacement de biomasse animale de la planète, aurait un rôle important dans le transfert du carbone de la surface vers le fond, mais aussi dans le mélange des masses d'eau et dans les cycles de nutriments. Dans le contexte actuel de croissance démographique humaine, cette biomasse mésopélagique pourrait représenter une nouvelle source de nourriture, à condition de développer les engins adéquats et d'assurer la durabilité de l'exploitation de ces espèces.

Au-delà de 1 000 m, peu d'organismes sont capables de s'adapter aux changements de pression que ce transit vers les zones nourricières de surface implique. Les espèces vivantes habitant à plus de 1 000 m de profondeur sont donc inféodées aux zones profondes où les sources d'énergie sont rares. De ce fait, les organismes marins se raréfient, et développent des adaptations uniques pour subsister : un métabolisme ralenti pour économiser leur énergie, une capacité à produire de la lumière pour attirer les proies, désorienter les prédateurs ou communiquer, et une détection des vibrations ou des champs électromagnétiques pour se repérer. Leur principale source de nourriture est la « neige marine », des particules issues de la décomposition des organismes vivant en surface et de leurs déchets qui coulent vers le fond.

Alors que la science peine encore à recenser la biodiversité des grands fonds marins et à comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes, on y décèle déjà la trace des sociétés humaines : pollution plastique, chimique, sonore, relargage de déchets et de sédiments, perte de conteneurs, installation d'infrastructures (câbles, prospection et exploitation d'énergies fossiles), entre autres. Les impacts de ces usages

humains sont largement inconnus et font partie des questions de recherche contemporaines.

Grands fonds marins et climat mondial

Un autre enjeu scientifique actuel consiste à comprendre l'impact du changement climatique sur les grands fonds marins, et réciproquement le rôle de ces milieux sur la régulation du climat. Nous venons de le décrire, les GFM sont connectés à la surface et à l'atmosphère par les échanges d'énergie et de matière, verticalement. Cette colonne verticale d'eau est cependant loin d'être statique. À l'échelle globale, les masses d'eau circulent telles une grande courroie de distribution transportant matière, éléments chimiques dont les nutriments et dioxyde de carbone, chaleur et énergie à travers les différents bassins océaniques, de la surface vers le fond et inversement. Cette circulation constitue l'un des moteurs principaux de la régulation du climat. C'est la circulation dite « thermohaline », nommée ainsi car elle est mise en mouvement par les vents en surface, et par les contrastes de densité des masses d'eau, en fonction de leur température et salinité. Aux pôles, les eaux de surface se refroidissent, augmentent en densité et coulent vers les grands fonds.

Sous l'effet du changement climatique, la fonte des glaciers et banquises relargue de grandes quantités d'eau douce et altère cette circulation. Un ralentissement partiel ou potentiellement total de certaines parties de cette circulation pourrait avoir des conséquences majeures sur nos climats. Par exemple dans le cas du Gulf Stream de l'Atlantique Nord, cela provoquerait des changements majeurs tels que la montée du niveau de la mer ou un refroidissement général du climat en Europe. Outre l'impact sur la régulation du climat, toute modification de la circulation thermohaline a des répercussions sur la distribution de la biodiversité, la dispersion des éléments chimiques depuis leur source jusqu'à leur puits et l'extraction de la chaleur depuis la terre interne vers les enveloppes superficielles de la Terre. Ces prévisions sont associées à de fortes incertitudes quant à leur amplitude potentielle car les processus impliqués peuvent inclure des boucles de rétroaction et des points de bascule encore mal compris.

Sur le fond, vie et histoire de l'océan

Sous la colonne d'eau, le fond rocheux ou sédimentaire est appelé « plancher océanique ». Dans ses parties sans relief, les plaines abyssales sédimentaires s'étendent sur des milliers de kilomètres au-delà du talus continental. Elles recouvrent environ 80 % des fonds océaniques avec des profondeurs autour de 4 000 à 5 000 m. Là, la faune est de très petite taille et de faible biomasse, mais bien plus nombreuse et diverse que dans la colonne d'eau. La mégafaune est peu abondante et constituée d'espèces qui se nourrissent de la matière déposée sur le fond (dépositores).

Les grands fonds marins représentent l'étape ultime de la pompe biologique du carbone : le carbone orga-

nique produit en surface puis contenu dans la neige marine sédimente lentement, s'accumule sur le fond et est dégradé par les bactéries, faisant des grands fonds un puits de capture à long terme du carbone atmosphérique. Dans certaines zones de forte accumulation de cette matière organique, la dégradation du carbone produit du méthane, autre gaz à effet de serre dont on ne connaît que partiellement le cycle dans l'océan profond. Des bactéries dites « méthanotrophes », présentes en abondance dans ces sédiments, dégradent le méthane avant qu'il ne soit libéré dans la colonne d'eau, limitant ainsi son flux vers la surface et son émission vers l'atmosphère.

Les accumulations successives de sédiments au fond des océans et les reliques des organismes vivants présents sous forme de fossiles nous informent sur les conditions chimiques et biologiques des océans à travers les temps géologiques, pouvant remonter jusqu'à 200 millions d'années. Ces « archives » climatiques sont les témoins privilégiés des crises environnementales océaniques passées relatant par exemple les variations brutales de pH, les fluctuations de la concentration en oxygène, ou encore les extinctions biologiques massives. L'étude de ces événements passés nous aident ainsi à mieux comprendre les crises actuelles (changement climatique, acidification des océans, montée des eaux, etc.) et à découpler l'impact des activités anthropiques de celui des variations naturelles.

Paysages des grands fonds

Le fond de mer n'est pas qu'une immense plaine abyssale. C'est le jumeau de la topographie des surfaces émergées : il présente des canyons, des plaines, des fosses et des cimes. La tectonique des plaques a modelé à travers les temps géologiques (à une vitesse équivalente à celle de la pousse d'un ongle) des paysages marins variés : plaines abyssales, monts et volcans sous-marins, pentes insulaires et continentales, canyons et failles. Les processus naturels régissent et façonnent ces lieux aux rythmes des déplacements des plaques et des éruptions volcaniques sous-marines, de leurs répercussions en termes d'aléas (séisme, tsunami, instabilité sédimentaire gravitaire, déstabilisation des hydrates de gaz, libération de composés chimiques létaux...) et des transferts de matière depuis les profondeurs de la Terre vers le plancher océanique (par exemple lors de l'épanchement de lave à Mayotte entre 2018 et 2021). Ces processus naturels restent aujourd'hui très mal compris dans leur fonctionnement interne et la temporalité de ces événements demeure encore indéterminée pour en évaluer les répercussions à court et long terme sur le milieu abiotique et biotique.

Les canyons sous-marins, ainsi que les rebords du plateau continental, fournissent des environnements de substrats durs qui abritent des communautés singulières particulièrement riches en biodiversité (jardins de coraux froids, gorgones, éponges, poissons, crustacés...). Ils constituent un habitat complexe, servant de refuge, de zone d'alimentation ou de nurserie pour d'autres invertébrés benthiques, attirant poissons péla-

giques et mammifères marins. Par ailleurs, ces reliefs agissent comme des entonnoirs qui transportent les nutriments, sédiments mais aussi polluants des zones superficielles, souvent côtières, vers le fond. Ces paysages du fond subissent les pressions anthropiques grandissantes, comme l'atteste l'impact du chalutage profond sur les coraux froids, la prolifération de macro- et microplastiques depuis l'environnement jusque dans le corps des organismes marins, ou encore les dépôts de fûts radioactifs à plus de 4 000 m de fond en Atlantique Nord.

Voyage au centre de la Terre, à 20 000 lieues sous les mers

Les grands fonds marins sont également au cœur des recherches qui tentent de comprendre le fonctionnement des différentes couches du globe terrestre et des interactions entre les couches les plus superficielles (le manteau et la lithosphère) avec le milieu aquatique, notamment au niveau des limites de plaques. Les limites de ces dernières sont de différentes natures, soit convergentes lorsqu'elles entrent en collision, soit divergentes lorsqu'elles s'écartent l'une de l'autre, soit transformantes lorsqu'elles coulissent l'une contre l'autre. Elles sont différentes dans leur expression morphologique mais similaires dans les phénomènes magmatiques, tectoniques et hydrothermaux qui s'y déroulent. L'énergie accumulée dans la lithosphère s'y libère sous forme de séismes et/ou de volcanisme.

Les interactions eau-roche au niveau de ces zones donnent naissance à des geysers de fluides hydrothermaux, le plus souvent chauds et enrichis en métaux et en composés réduits (dont l'hydrogène sulfuré, le dioxyde de carbone, le méthane et l'hydrogène). La plupart du temps, c'est la source de chaleur en profondeur associée à la chambre magmatique qui est le moteur de la circulation hydrothermale. Pourtant, des résurgences émergent de manière impromptue spatialement là où les réactions exothermiques des interactions eau-roche (réaction de serpentinisation) apportent la chaleur nécessaire pour provoquer une circulation hydrothermale. En 50 ans de recherche, notre compréhension de l'hydrothermalisme marin a permis de mettre à jour l'hydrothermalisme lié à une diversité de contextes, de natures, et de processus (résurgences à haute ou basse températures, contexte d'accrétion ou au contraire de collision), mais dont le fonctionnement, la dynamique et l'évolution spatio-temporelle demeurent largement méconnus et mal contraints dans les modèles numériques.

Les interactions entre la roche et l'eau jouent en outre un rôle central dans les cycles biogéochimiques des nutriments (azote, phosphore, silice, fer parmi d'autres), indispensables à la vie océanique, ainsi que des métaux, des éléments traces et des terres rares. L'étude de toutes les contributions des grands fonds marins à ces grands cycles biogéochimiques est une question de recherche prioritaire aujourd'hui dans la communauté académique. L'enjeu est double : mieux comprendre le rôle des grands fonds marins dans le fonctionnement des océans et l'habitabilité de la

planète, mais également mieux saisir les processus de formation des ressources minérales présentes. Ainsi, la lente précipitation (plusieurs millénaires) des métaux contenus dans les fluides hydrothermaux ou dans l'eau de mer forme des sulfures massifs, des encroûtements cobaltifères et des nodules polymétalliques. Entre 3 000 et 5 500 m de profondeur, la présence à la surface du sédiment de nodules polymétalliques sur de vastes zones profondes permet la fixation d'une faune spécifique (coraux, éponges) différente de celle des sédiments environnants. Les impacts d'une potentielle exploitation des nodules sur ces communautés sont encore méconnus (Amon, 2022).

Points chauds de vie dans les grands fonds marins : des écosystèmes sans lumière

Le panache hydrothermal, souvent chaud et acide, semble à première vue un milieu hostile à la vie. Pourtant, en 1977, lors d'une plongée d'exploration du sous-marin habité Alvin à la dorsale des Galapagos, les scientifiques ont observé de leurs propres yeux des systèmes hydrothermaux aux écosystèmes luxuriants. L'énergie chimique apportée par le fluide hydrothermal (composés chimiques réduits tels que l'hydrogène sulfuré, le dioxyde de carbone, le méthane, le fer, etc.) est utilisée par des micro-organismes pour produire de la matière organique et soutenir ces écosystèmes particuliers *via* ce que l'on nomme la « chimiosynthèse » microbienne. Ces micro-organismes peuvent être libres dans l'environnement, former des tapis ou être en association symbiotique avec des animaux de plus grande taille, comme certaines espèces de crevettes ou de bivalves. Ces écosystèmes sont très productifs, abritent une faune caractérisée par de plus fortes densités mais de plus faibles diversités que celles des plaines abyssales et un fort taux d'endémisme. Les habitats associés aux sites actifs et inactifs ont des caractéristiques physico-chimiques contrastées, qui contribuent à la structuration des communautés à travers leurs besoins nutritifs et leurs adaptations aux conditions extrêmes.

L'action de la chimiosynthèse dans la structuration des écosystèmes profonds a été identifiée à d'autres structures géologiques particulières, notamment les volcans de boue, les diapirs et les *pockmarks* localisées sur des marges continentales passives ou actives. Toutes ces structures sont, là encore, caractérisées par des émissions de fluides enrichis en éléments chimiques réduits notamment en méthane, que les consortia microbiens dans les couches superficielles de sédiment utilisent à bon escient. Ainsi, la faune se distribue de manière hétérogène en fonction de la présence d'un fluide et de ses caractéristiques chimiques, de son débit, et de la diversité des substrats.

D'autres habitats temporaires (quelques dizaines d'années) sont fournis par les carcasses de baleines et autres apports massifs de matière organique abritant une succession d'organismes. La dégradation de la matière organique par des micro-organismes produi-

sant de l'hydrogène sulfuré permet même l'installation de communautés chimiosynthétiques.

La biodiversité des écosystèmes des grands fonds, par les adaptations qu'elle déploie pour faire face aux conditions inhospitalières de ces milieux extrêmes, nous interroge sur les origines et limites de la vie, sur Terre et sur certaines lunes du système solaire dont les conditions environnementales sont analogues aux grands fonds marins. Par ailleurs, certains acteurs économiques et industriels espèrent y trouver des molécules utiles à la société (résistance à la chaleur, à la toxicité, dépollution, etc.).

Conclusion

L'exploration de ce qui est encore considéré comme une des dernières frontières a d'abord des objectifs de connaissances fondamentales : quelles sont les limites de la vie sur Terre ? Comment fonctionnent les écosystèmes marins ? Comment ces derniers se sont-ils adaptés à des conditions de vie extrêmes ? Quel est le rôle de l'océan profond dans la régulation du climat ?

Le développement des moyens d'accès et l'intensification des explorations ont permis de découvrir plusieurs écosystèmes particuliers depuis les années 1970, dans des contextes géologiques et géographiques très diversifiés (plaines abyssales, canyons, monts sous-marins, sources hydrothermales et émissions de méthane, biosphère profonde, Ramirez-Llordra *et al.*, 2010). Les grands fonds marins constituent ainsi un assemblage de paysages complexes abritant une grande diversité biologique, soutenue par deux grandes sources d'énergie. Cependant, notre connaissance des écosystèmes profonds reste encore très fragmentée. Ainsi, le « simple » recensement de la biodiversité marine demeure un objectif majeur. Le projet international Census of Marine Life (2010) a recensé 250 000 espèces marines et évalué qu'au rythme actuel des découvertes, les océans pourraient en abriter entre 1 et 10 millions.

La vision actuelle d'un océan profond, non plus isolé mais connecté à la surface par les mouvements des masses d'eau pose également la question du rôle des écosystèmes profonds dans le fonctionnement global de l'océan et des grands cycles biogéochimiques. Ceux-ci vont notamment jouer un rôle dans la régulation du climat à travers la séquestration du carbone, la distribution des nutriments et le stockage et la redistribution de la chaleur. La vision de cet océan isolé et intouché (« *pristine* ») est également aujourd'hui mise à mal par les études montrant les impacts anthropiques visibles, avec la présence de polluants organiques persistants et de micro plastiques dans les couches les plus profondes de l'océan.

La raison d'être du PEPR « Grands fonds marins : savoirs, usages, communs » est la production de connaissances sur les grands fonds marins. Améliorer quantitativement et qualitativement les connaissances sur les grands fonds marins est une tâche de grande ampleur qui ne peut se concrétiser sans un cadre scientifique interdisciplinaire large, impliquant l'ensemble

des communautés des sciences de la nature et de la société.

Le PEPR GFM postule aussi que les questionnements issus de différents secteurs de la société enrichiront les problématiques explorées par les scientifiques. Leurs complémentarités et interactions favoriseront une connaissance plus holistique des grands fonds marins, de leurs évolutions, de leurs usages et de leurs modes de gouvernance. De plus, les acteurs non-académiques ne raisonnent pas nécessairement selon des lignes disciplinaires et leurs questions, complexes et dans des situations d'incertitudes multiples (les *wicked problems*), nécessitent souvent des réponses indifférentes aux frontières disciplinaires. En d'autres termes, la transdisciplinarité – comme co-construction des projets entre acteurs académiques et non-académiques, dès l'amont à partir des questionnements – peut renforcer une large interdisciplinarité entre les sciences sociales et les sciences naturelles, dans une boucle de rétroaction positive.

Références bibliographiques

- BELL KATHERINE L. C., KRISTEN N. JOHANNES, BRIAN R. C. KENNEDY, & SUSAN E. POULTON (2025), "How little we've seen: A visual coverage estimate of the deep seafloor", *Science Advances*, 11(19):eadp8602, <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp8602>
- SANDER S. G., TAMBURINI C., GOLLNER S., GUILLOUX B., PAPE E., HOVING H. J., LEROUX R., ROVERE M., SEMEDO M., DANOVARO R. & NARAYANASWAMY B. E. (2025), "Deep sea research and management needs", Muñiz Piniella A., Kellett P., Rodriguez Perez A., Alexander B., Bayo Ruiz F., Teodosio M. C., Heymans J. J. (Eds.), *Future Science Brief n°12 of the European Marine Board*, Ostend, Belgium, ISSN : 2593-5232, ISBN : 9789464206357, <https://doi.org/10.5281/zenodo.14928917>
- RAMIREZ-LLODRA E., BRANDT A., DANOVARO R., MOL B., ESCOBAR E., GERMAN C., LEVIN L., MARTINEZ ARBIZU P., MENOT L., BUHL-MORTENSEN P., NARAYANASWAMY B., SMITH C., TITTENSOR D., TYLER P., VANREUSEL A. & VECCHIONE M. (2010), "Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem", *Biogeosciences*, 7(9), pp. 2851-2899, <https://doi.org/10.5194/bg-7-2851-2010>
- AMON D. J *et al.* (2022), "Assessment of scientific gaps related to the effective environmental management of deep-seabed mining", *Marine Policy*, 138, 105006, <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2022.105006>

La Flotte océanographique française et l'accès aux grands fonds marins : enjeux stratégiques et technologiques

Par Maximilien SIMON

Adjoint au directeur de la flotte océanographique à l'Ifremer

Jan OPDERBECKE

Directeur adjoint de la Flotte Océanographique Française, en charge des projets et de l'innovation

& Christine DAVID

Directrice adjointe et directrice scientifique de la Flotte océanographique française

La Flotte océanographique française (FOF), opérée par l'Ifremer, est un acteur clé de l'exploration des grands fonds marins. Face à des enjeux stratégiques – climat, paléoclimats, géologie, biodiversité ou risques naturels –, elle déploie des navires et engins sous-marins pour répondre aux défis scientifiques. Avec une capacité de déploiement mondial et des technologies innovantes (robotique, IA, jumeaux numériques), la FOF relève un triple défi : explorer loin, profondément et durablement. La FOF fait face aujourd'hui à plusieurs défis capacitaires et technologiques pour l'accès aux grands fonds, notamment le renouvellement du navire tous océans l'*Atalante*.

Contexte

L'océan est incroyablement vaste et difficile d'accès : 71 % de la surface de notre planète est recouverte par ce milieu qui s'étend jusqu'à une profondeur moyenne de 3800 mètres. La connaissance de l'océan et de son fonctionnement repose donc sur des moyens d'exploration tels que les navires océanographiques et les engins sous-marins. La Flotte océanographique française (FOF), opérée par l'Ifremer, offre aux communautés scientifiques un ensemble de moyens uniques et irremplaçables pour explorer et échantillonner l'ensemble de l'océan mondial et jusqu'à des profondeurs de 6 000 mètres, soit un accès à près de 95 % du plancher océanique.

Au même titre que l'espace, l'océan est souvent qualifié de frontière du savoir. Son fonctionnement et sa description restent encore largement inconnus et les moyens océanographiques évoluent continuellement pour répondre aux besoins des communautés scientifiques en sciences océaniques. À l'occasion d'un exercice collectif de prospective conduit en 2023-2024 (Simon et al. 2025), la FOF a identifié six grands enjeux

de recherche pour lesquels les moyens océanographiques sont indispensables :

- La compréhension du rôle de régulateur de l'océan dans le système climatique et les modifications profondes qui se déroulent actuellement. La dynamique des courants et la vie marine font de l'océan un régulateur majeur du climat terrestre. Ce « puits de carbone » est cependant encore très mal quantifié. Les navires océanographiques permettent de recueillir des données essentielles dans ce domaine lors de campagnes telles que OVIDE, OISO et de nombreuses autres.
- La reconstitution des paléoclimats qui se base sur les archives sédimentaires marines. Dans ce domaine, la capacité de carottage, et notamment de carottage très long, de la FOF est un atout essentiel, comme en témoigne par exemple la carotte sédimentaire de 69 mètres de long recueillie en 2010 et qui permet de remonter jusqu'à 1,5 million d'années¹.

¹ <https://www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/un-nouveau-record-de-carottage-sedimentaire-depuis-le-no-marion-dufresne-pour-une-science>

- La connaissance géologique et géophysique de la croûte océanique. Le système quasi continu de dorsales océaniques représente une structure géologique d'environ 65 000 km de long qui repose en moyenne à 2 500 m de profondeur. Malgré le formidable développement de l'exploration sous-marine depuis le milieu du XX^e siècle, seuls quelques engins sous-marins au monde sont aujourd'hui capables d'atteindre ces profondeurs. La cartographie détaillée du fond de l'océan n'est disponible que pour 25 % de sa surface. Les moyens de la FOF, en particulier les engins sous-marins, sont indispensables pour y accéder.
- La connaissance de la diversité du vivant abrité par l'océan. L'océan est le plus étendu des biomes de notre planète mais également le moins exploré. Décrire la biodiversité océanique et comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes restent donc des objectifs fondamentaux pour la recherche. L'exploration de ce biome est cependant fortement biaisée, en faveur des zones géographiques et des habitats les plus accessibles. Par exemple, les environnements des zones tempérées de l'Atlantique Nord sont bien mieux connus que ceux de l'océan Indien ou des hautes latitudes ; les habitats côtiers sont mieux connus que les habitats des grandes profondeurs. Cela reste un défi technologique majeur que d'échantillonner les écosystèmes au-delà de 4 000 mètres : seule une petite dizaine d'engins sous-marins au travers du monde en est capable.
- L'anticipation des événements extrêmes : séismes, volcanisme, tsunamis, vagues de chaleur marine, zones de minimum d'oxygène, submersions marines. Certains de ces phénomènes vont devenir plus fréquents et plus intenses en raison du dérèglement climatique. Cet enjeu de recherche appelle à une intensification de l'observation de l'océan.
- L'anthropisation de l'océan, notamment l'exploitation des ressources halieutiques et les pollutions, fait peser des risques sanitaires et alimentaires sur les populations humaines.

Pour ces grands enjeux de recherche, il faut souligner un déficit de données et de connaissances dans les zones profondes et dans celles éloignées de l'hémisphère Nord tempéré. Par ailleurs, les changements climatiques en cours impliquent d'étudier plus finement et plus intensément certaines régions qui deviennent plus sensibles aux pressions : mer Méditerranée, zones tropicales et polaires. Enfin, il est important de souligner que la compréhension de nombreux phénomènes et processus requiert des observations sur le temps long.

C'est donc un défi triple que doivent relever les flottes océanographiques et en particulier la FOF : explorer loin, profondément, et sur le long terme.

Les missions et capacités d'action de la Flotte océanographique française

L'Ifremer gère et opère un ensemble unique de navires et d'engins sous-marins au service de l'ensemble de la communauté scientifique nationale (voir la Figure 1).

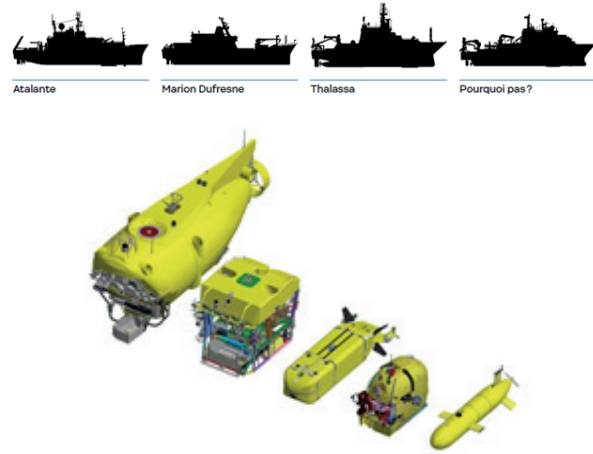


Figure 1 : Navires hauturiers de la FOF et engins sous-marins : sous-marin Nautilus, ROV Victor 6000 AUV Ulyx, ROV hybride Ariane, AUVs 3000m asterX et idexX (Source : Ifremer).

La capacité de projection de la FOF sur l'ensemble des bassins océaniques, des côtes aux abysses, en fait l'une des trois plus grandes flottes en Europe et la cinquième au monde, aux côtés de celles des États-Unis, du Japon, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. En Europe, elle est la seule, avec la flotte océanographique allemande, à pouvoir projeter ses moyens en Méditerranée, dans l'Atlantique, l'océan Indien et le Pacifique.

La FOF dispose d'une capacité technique et opérationnelle reconnue dans le monde entier pour l'exploration des grands fonds marins. Elle possède une panoplie cohérente d'engins sous-marins qui représentent à la fois l'histoire d'une culture emblématique nationale de sous-marins pour l'exploration des océans depuis les années 1950 (bathyscaphe, Cyana, puis Nautilus), et d'un savoir-faire reconnu aujourd'hui dans le développement de systèmes robotisés à la pointe des technologies (ROV Victor 6000, Ariane, AUV Ulyx).

Trois engins fondent la capacité de la FOF à atteindre 6 000 mètres de fond, avec notamment deux engins dits « d'intervention » qui ont la capacité de recueillir des échantillons :

- Le Nautilus², sous-marin habité, mis en service en 1984, 19 tonnes, missions d'exploration et d'intervention, plus de 2 000 plongées, modernisation complète pour une prolongation de vie jusqu'en 2035 au moins. Avec trois personnes dans sa sphère habitée, et sans être contraint par un câble le reliant au navire de surface, Nautilus est performant dans l'exploration de sites complexes. Avec son inertie et des manipulateurs puissants, il excelle dans les travaux d'intervention. Ses plongées sont toutefois limitées à une dizaine d'heures par l'énergie embarquée et les réserves d'oxygène.

² <https://www.ifremer.fr/fr/flotte-oceanographique-francaise/decouvrez-les-navires-de-la-flotte-oceanographique-francaise/le-nautilus>

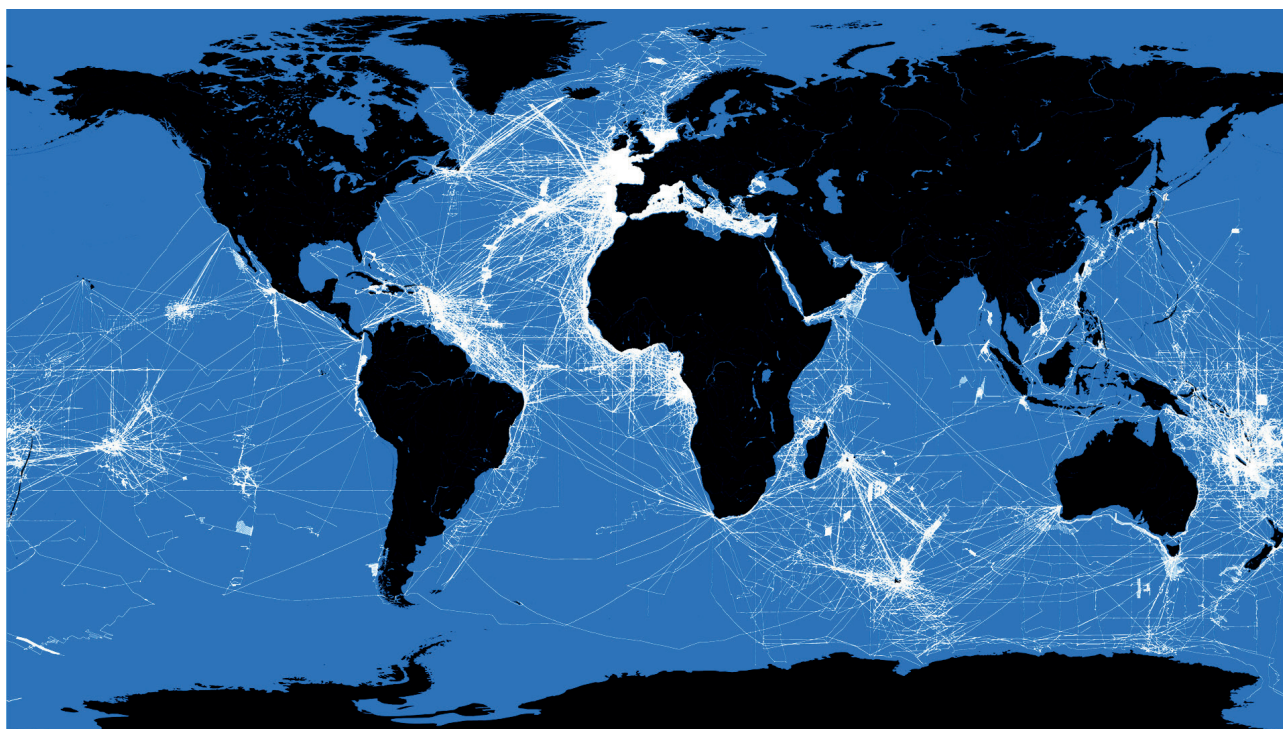


Figure 2 : Carte des campagnes océanographiques françaises depuis 1920 (Source : Ifremer).

- Le ROV (*remote operated vehicle*) Victor 6000³, mis en service en 1997, Victor est relié à son navire porteur par 8,5 km de câble. Le véhicule Victor pèse près de 5 t. Les plongées à durée indéterminée, suivies depuis la surface ou même depuis la terre avec un accès grandissant aux données acquises au fond, se caractérisent par la mise en œuvre de nombreuses caméras, de capteurs et de préleveurs constituant un laboratoire plongeant téléopéré.
- L'AUV (*autonomous underwater vehicle*) Ulyx⁴ est le dernier né des engins 6 000 mètres de la FOF. Un AUV est l'équivalent d'un drone, il navigue à une distance de plusieurs dizaines de mètres du fond pour la cartographie acoustique, ou à quelques mètres seulement, très près du fond, pour la prise d'images optiques (levée de doute, photogrammétrie... Ulyx est capable d'adapter le programme de mission préétabli afin de réaliser un objectif de la plongée. Ulyx a environ 24 h d'autonomie en fonction de la profondeur, du relief et des charges utiles.

Ces engins sont uniques pour les scientifiques pour plusieurs raisons :

- leurs « charges utiles », c'est à dire l'ensemble des capteurs, bras manipulateurs, préleveurs et sondes, entièrement conçues pour et avec les laboratoires utilisateurs ;

³ <https://www.ifremer.fr/fr/flotte-oceanographique-francaise/decouvrez-les-navires-de-la-flotte-oceanographique-francaise/victor-6000>

⁴ <https://www.ifremer.fr/fr/flotte-oceanographique-francaise/decouvrez-les-navires-de-la-flotte-oceanographique-francaise/ulyx>

- la capacité de la FOF à déployer ces engins sur l'ensemble de l'océan mondial.

La Flotte océanographique française est constituée de 17 navires, 6 engins sous-marins, dont 3 engins 6 000 mètres.

Les enjeux capacitaires et technologiques de demain

La FOF fait face aujourd'hui à plusieurs défis capacitaires et technologiques pour l'accès aux grands fonds.

Le premier et le plus structurant de ces enjeux est le maintien d'une capacité tout océan avec deux navires porteurs d'engins grand fond

Les deux navires qui déploient les engins d'intervention (Nautile ou Victor) sont l'Atalante et le Pourquoi Pas ? ; ces navires ont été conçus notamment pour cela : ils disposent des appareils de pont pour déployer ces engins de plusieurs tonnes et peuvent partir en autonomie sur des zones d'études pendant 30 à 40 jours. La capacité de la FOF à intervenir dans les grands fonds marins repose sur un binôme de navires mettant en œuvre les engins sous-marins de la Flotte. Ce dispositif permet une disponibilité permanente d'au moins un ensemble navire-engin grand fond et confère à la FOF cette capacité unique à atteindre quasiment n'importe quel point du plancher océanique, hors zones englacées et fosses ultra-profondes.

À partir de 2030, l'Atalante, qui aura 40 ans, devra être sortie du service. Le renouvellement de ce navire par

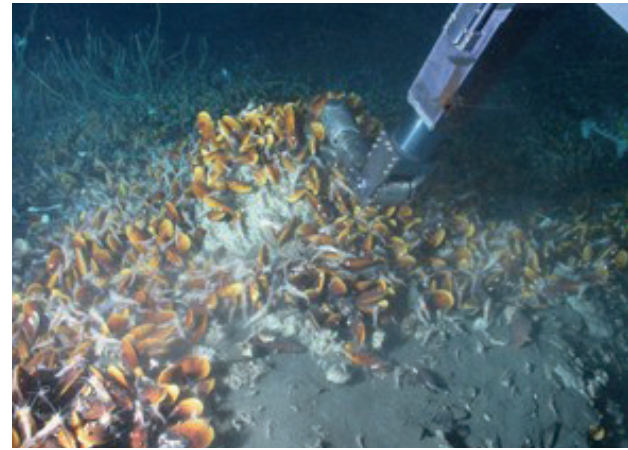
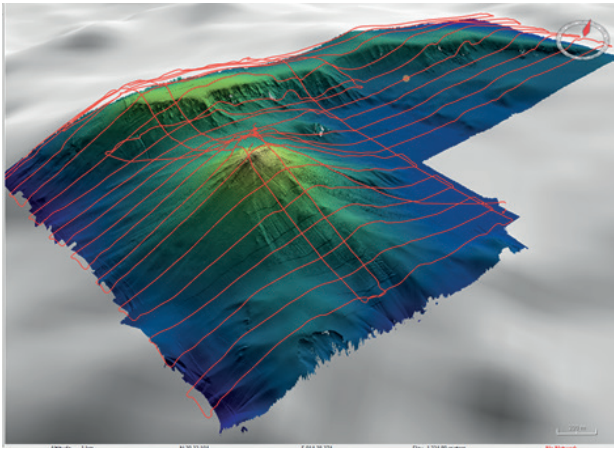


Figure 1 : a) Site volcanique cartographié avec l'AUV UlyX ; b) Prélèvement de faune avec Victor 6000.

un navire capable de déployer Nautilo ou Victor est indispensable. En 2030, Nautilo et Victor auront été modernisés et seront capables de servir la communauté scientifique pendant encore 10 à 15 ans. La perte d'un navire porteur d'engin d'intervention grand fond serait incohérente avec les investissements publics mobilisés en faveur de l'évolution de ces engins et plus généralement de l'exploration des grands fonds – objectif 10 de France 2030.

Les enjeux scientifiques associés au renouvellement de l'Atalante sont cruciaux : connaissance des écosystèmes profonds, connaissance géologique et géophysique de la croûte océanique. S'y ajoutent la nécessité de renouveler la capacité de carottage sédimentaire de grands fonds et de la déployer sur l'océan mondial. En effet, la reconstitution et l'étude des paléoclimats sont essentielles pour comprendre les changements climatiques en cours. Les carottes sédimentaires marines sont l'une des sources principales de données pour remonter à plus d'un million d'années en arrière. Dans ce domaine, le carottage sédimentaire grand fond de la FOF est un atout unique au monde, comme en témoigne le record mondial⁵ battu en 2019. Cette capacité est portée actuellement par le Marion Dufresne mais reste sous-utilisée en raison de l'affectation de ce navire à l'océan Indien. Le renouvellement de l'Atalante est l'occasion de transférer cette capacité sur ce nouveau navire.

L'amélioration de la capacité de grands fonds via l'intégration des avancées technologiques et le développement de nouveaux engins, instruments et fonctions est un défi relevé quotidiennement par les équipes d'ingénieurs et de technologues de la FOF

Les engins sous-marins sont majoritairement conçus et développés par les équipes d'ingénierie de la FOF. Gérés sur des cycles de vie de plusieurs décennies, ces engins représentent des plateformes ouvertes évoluant au fil des années pour répondre aux besoins des campagnes scientifiques et aux nouvelles oppor-

tunités technologiques. L'augmentation continue des ressources relatives à l'énergie embarquée, à l'instrumentation, à la gestion et aux traitements de la donnée, au contrôle/commande des engins et des équipements, permet de réaliser des missions et tâches novatrices et habilitantes pour l'exploration scientifique.

Les capacités nouvelles au niveau des engins individuels s'accompagnent de méthodologies mettant en œuvre des engins de différents types, des navires et des USV. La qualité du géoréférencement en particulier a conduit à la possibilité d'associer des données de différents types, résolutions et origines pour assembler des agrégats de données multimodales décrivant les fonds marins de manière de plus en plus exhaustive. Les sciences de l'océan s'orientent, grâce à ces capacités d'acquisition, vers la construction de « jumeaux numériques » pour modéliser, comprendre et prédire les phénomènes régissant le fonctionnement des océans.

Les enjeux technologiques pour l'exploration et l'intervention dans les grands fonds marins donnent lieu à des travaux de R&D engagés selon trois axes majeurs

L'autonomie décisionnelle

L'autonomie décisionnelle représente l'enjeu majeur pour les robots.

L'AUV Ulyx de la FOF ouvre la voie à des décisions intelligentes en mettant en œuvre un langage de mission de nouvelle génération. Ce langage associe l'analyse de l'information par des algorithmes puissants (conventionnels ou IA) à une arborescence logique « déterministe » de prise de décision. Les comportements et actions activés en fonction des informations produites sont individuellement validés au préalable. On obtient ainsi un potentiel d'intelligence embarquée qui reste vérifiable en préparation et traçable en opération, tout en ouvrant la voie aux technologies de l'IA.

Ces mécanismes représentent une boîte à outils qui permet d'implémenter des stratégies intelligentes de plongée adaptées à chaque problématique scientifique selon les objectifs précis des campagnes océanographiques. Dans les années à venir, les opérateurs d'Ulyx et les scientifiques pourront définir les stratégies spéci-

⁵ <https://www.flotteoceanographique.fr/Toutes-les-actualites/Record-de-longueur-de-carotte-sedimentaire-battu>

fiques de plongée en amont des opérations : recherche de sites hydrothermaux, exploration des contours d'un relief, suivi de plumes de diffusion de gaz...

L'intervention interactive sur le fond marin

L'intervention interactive sur le fond marin, sous la forme de télémanipulation avec des engins de type ROV, évoluera de façon spectaculaire. Basées essentiellement sur l'usage de bras robotisés, les actions d'intervention pour le prélèvement, les manipulations sur objets naturels ou artificiels et les connexions devront dépasser les limites techniques encore prépondérantes : vision 2D sur retour vidéo, éclairage non optimisé, latence dans l'exécution des commandes, ergonomie de l'opération de bras jusqu'à sept degrés de liberté de mouvement.

Le domaine de la manipulation évolue autour des technologies de la modélisation 3D de l'environnement par photogrammétrie en temps réel, et de la mise en cohérence avec un modèle tridimensionnel et cinétique du robot et de ses extensions (bras...). Un enjeu à moyen terme consiste à commander de manière automatisée et intelligente non seulement le pilotage du robot, mais également les actions de manipulation, de mesures in situ pointues et de prélèvement. Les outils de réalité augmentée mettant en œuvre les jumeaux numériques du robot et de l'environnement local, permettent à l'utilisateur de commander avec des outils visuels, un prélèvement en désignant simplement l'objet visuel, ou un docking mécanique à un ascenseur, par exemple.

La perception 3D

La perception 3D a progressé ces dernières années avec en premier lieu des techniques de photogrammétrie et de la reconstruction 3D en acoustique et en optique ; elle représente un axe fondamental pour les trois principaux champs d'application des systèmes sous-marins : l'autonomie des robots, pour la manipulation et l'intervention assistées, et pour la compréhension de l'environnement proche pour les pilotes et les scientifiques.

L'enjeu pour les années à venir est de générer les modèles visuels de la scène en cours de plongée et d'utiliser la représentation 3D de l'environnement comme une aide pour la conduite de la plongée. Avec l'application de marquages optiques passifs, de la reconstruction optique 3D en temps réel et de la réalité augmentée, les scientifiques et les opérateurs auront à leur disposition de nouveaux outils pour la compréhension qualitative et quantitative de la scène observée. Ils pourront en outre mesurer en temps réel et directement dans les images fournies par les caméras des robots, les distances, les surfaces, les angles relatifs entre les objets observés et les manipulateurs.

La conception d'instrumentations scientifiques spécialement adaptées

La conception d'instrumentations scientifiques spécialement adaptées à une implémentation sur les ROV et AUV fait l'objet de développements conduits en associant laboratoires scientifiques et constructeurs d'engins sous-marins. Les robots sont alors conçus dans une logique fonctionnelle autour des ensembles instrumentaux implémentés... On distingue trois familles

d'équipements, dédiées *i*) à la perception des fonds et du milieu sous-marin (caméras optiques spécialisées, sonars et sondeurs scientifiques, lidar...), *ii*) à la mesure *in situ* (sondes de température, de résistance électrique, d'analyse chimique de fluides...), et *iii*) au prélèvement (carottiers et foreuses, échantillonneurs d'eau et de gaz, séquenceurs d'ADN environnemental...).

La télé-opération

L'essor des capacités de la télé-opération représente un défi technologique et organisationnel pour la flotte et pour les engins sous-marins en particulier. D'ores et déjà, les logiciels de gestion de plongée sont conçus dans des technologies web permettant le travail collaboratif. L'implication de personnels à terre dans l'accompagnement de la plongée répond à la sophistication technologique des engins et des équipements scientifiques mis en œuvre. Des compétences pointues peuvent ponctuellement être mobilisées à terre pour compléter à distance les équipes, que ce soit des experts scientifiques, des opérateurs, voire des ingénieurs.

Pour aller plus loin

www.flotteoceanographique.fr

MAXIMILIEN S., LEFORT O., DAVID-BEAUSIRE C. *et al.* (2025), « À quoi ressemblera demain la Flotte océanographique française ? », 11 juin 2025, <https://doi.org/10.13155/106798>

BRIGNONE L. *et al.* (2023), "Validation at sea of UlyX, the latest deep diving AUV for oceanographic research", IEEE-MTS, Oceans 23 - Limerick, pp. 1-6, Ireland, June 2013, https://doi.org/10.1109/OCEANS_Limerick52467.2023.10244279

La gouvernance internationale de l'océan profond : un maillage normatif et institutionnel complexe mais structuré

Par Dr Bleuenn GUILLOUX

Chaire de professeur Junior en droit de la mer et de l'environnement

Laboratoire Littoral ENvironnement et Sociétés (LIENSs) (UMR 7266), La Rochelle Université

Et Dr Youna LBL LYONS

Présidente, ACOPS (Advisory Committee on the Protection of the Sea), Londres

Présidente, ACOPS Comité Consultatif pour la Protection de la Mer, Brest

Senior Global Fellow, CIL – National University of Singapore

L'océan profond fait l'objet d'un encadrement juridique et institutionnel dense, structuré autour de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) et des institutions qui contribuent à sa mise en œuvre.

Cet article propose une vue d'ensemble de cette gouvernance internationale en examinant les principaux régimes applicables à plusieurs activités maritimes majeures menées dans l'océan profond, parmi lesquelles les activités minières profondes, la pêche, les ressources génétiques marines, la recherche scientifique marine, les câbles sous-marins et certaines activités liées à la lutte contre les changements climatiques.

Il met en évidence la diversité des mécanismes institutionnels mobilisés, ainsi que le rôle potentiellement central de l'Accord BBNJ dans le renforcement de la coopération et de la coordination entre institutions. Loin d'un espace de non-droit, l'océan profond apparaît ainsi comme un espace de gouvernance complexe mais structuré.

Introduction

L'océan profond débute à partir de 100 ou 200 mètres de profondeur, avec la *twilight zone* (zone crépusculaire). Il représente plus de 80 % de l'océan en surface et davantage encore en volume. Des pôles à l'équateur, il englobe l'essentiel du milieu marin à l'exception de la zone côtière. Il joue un rôle majeur dans les équilibres climatiques et biogéochimiques planétaires, notamment à travers les mécanismes de circulation océanique, le stockage de chaleur, les pompes biologiques et physico-chimiques du carbone, ainsi que les processus biologiques et la biodiversité et, plus généralement, les dynamiques écologiques qui sous-tendent le fonctionnement des écosystèmes marins et le bon état du milieu marin.

Si les sociétés humaines utilisent l'océan depuis des millénaires, l'exploration et l'exploitation de l'océan

profond n'ont véritablement pris leur essor qu'avec les progrès scientifiques et technologiques des XIX^e et XX^e siècles. Le maillage institutionnel de la gouvernance de l'océan s'est ainsi progressivement construit en réponse aux rivalités entre États et au développement des usages maritimes, qu'il s'agisse du commerce, de la pêche ou de l'exploration scientifique.

Certaines préoccupations relatives à la protection du milieu marin sont anciennes. Toutefois, la conscience internationale de la nécessité de le protéger ne s'est fortement affirmée qu'à partir de la fin des années 1960. Cet article propose une vue d'ensemble de la gouvernance de l'océan profond à travers l'étude du maillage normatif et institutionnel qui encadre les principales activités maritimes déployées dans ces espaces. Il s'intéresse en particulier à la manière dont certaines activités maritimes font l'objet de mécanismes institutionnels spécialisés exerçant des fonctions régulatrices, tandis

que d'autres demeurent caractérisées par des formes de gouvernance plus diffuses ou fragmentées¹.

La Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) : point d'ancrage de la gouvernance de l'océan

Une « constitution pour les océans »

Les mécanismes contemporains de gouvernance de l'océan, y compris de l'océan profond, s'articulent principalement autour de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) adoptée en 1982². Souvent qualifiée de « Constitution pour les océans » (Mann Borgese, 1978), elle fixe le cadre spatial, fonctionnel et juridictionnel des activités maritimes (Chaumette, 2021 ; Tanaka, 2019 ; Forteau et Thouvenin, 2017 ; Proelss, 2017 ; Rothwell *et al.*, 2015 ; Nordquist, 1985-2013). Son préambule affirme la volonté d'établir « un ordre juridique pour les mers et les océans » conciliant communications internationales, utilisation des ressources marines et protection du milieu marin.

Malgré certaines formulations générales ou pouvant paraître datées, la CNUDM a montré une remarquable capacité à s'adapter à l'évolution des usages, des connaissances scientifiques et du droit international. Cette résilience repose notamment sur trois atouts. La première tient au caractère évolutif de son interprétation, les juridictions internationales mobilisant des approches dynamiques pour interpréter certaines dispositions au regard de l'évolution des connaissances scientifiques et du droit international (Boyle, 2005 ; Heidar, 2020). La deuxième résulte de son architecture à la fois substantielle et fonctionnelle. La CNUDM contient des règles directement applicables mais elle s'appuie aussi sur des normes, des procédures et des standards développés dans d'autres cadres institutionnels compétents, incorporant ainsi du « droit futur ». Véritable « pieuvre juridique » de la gouvernance de l'océan, elle étend ses ramifications à travers une pluralité de régimes spécialisés participant à sa mise en

œuvre et à son évolution. La troisième réside dans le caractère obligatoire de son système de règlement des différends. En ratifiant la Convention, les États acceptent en principe de pouvoir être soumis à des procédures juridictionnelles ou arbitrales obligatoires relatives à son interprétation ou à son application, sous réserve de certaines exceptions facultatives³.

Par ailleurs, la CNUDM a été complétée par trois accords de mise en œuvre applicables à l'océan profond : l'Accord de 1994 relatif aux ressources minérales de la Zone⁴, l'Accord de 1995 sur les stocks chevauchants et de poissons grands migrateurs⁵, ainsi que l'Accord BBNJ de 2023 sur la biodiversité marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale⁶. Ces accords viennent préciser, opérationnaliser et compléter certaines dispositions de la CNUDM afin d'en faciliter la mise en œuvre.

Une architecture institutionnelle dense et évolutive construite autour de la CNUDM

La CNUDM résulte de longues négociations fondées sur un package deal entre États aux intérêts divergents, notamment entre États maritimes, États côtiers, puissances industrialisées et pays en développement. Les États nouvellement indépendants, réunis notamment au sein du Groupe des 77, ont activement participé à ces négociations, portant en particulier les revendications du Nouvel Ordre Économique International dans le domaine maritime. Ils ont par exemple contribué à façonner le concept de patrimoine commun de l'humanité et ont revendiqué un accès plus juste aux bénéfices tirés des espaces et ressources marines⁷.

La CNUDM cherche ainsi à concilier souveraineté et droits souverains des États côtiers, libertés de la haute mer, exploitation des ressources naturelles marines, coopération internationale et protection du milieu marin. Elle organise une différenciation des espaces maritimes au sein desquels les États disposent de droits, de compétences et d'obligations variables. Les espaces sous juridiction nationale coexistent avec des espaces internationaux régis par des principes distincts, tels que la liberté de la haute mer ou le patrimoine commun de

¹ Le transport maritime international, pourtant central dans la gouvernance de l'océan, n'est pas abordé ici. Cette exclusion s'explique à la fois par le champ retenu, centré sur l'océan profond, et par le degré particulièrement avancé d'institutionnalisation de son encadrement juridique autour de l'Organisation maritime internationale (OMI) qui mériterait à lui seul une analyse dédiée. Certaines activités liées à l'océan profond, notamment les activités militaires et stratégiques, ne sont pas davantage développées. Souvent marquées par des logiques de confidentialité, des enjeux de sécurité nationale ou des usages duaux, elles soulèvent des problématiques juridiques, géopolitiques et technologiques spécifiques. D'autres usages, tels que les énergies marines, le tourisme ou les activités relatives au patrimoine culturel subaquatique, ne pourront également être traités dans le cadre limité de cette contribution.

² Cette convention, également appelée « Convention de Montego Bay » en référence à son lieu d'adoption, le 10 décembre 1982, en Jamaïque, est entrée en vigueur le 16 novembre 1994. Elle compte actuellement 172 parties, dont l'Union européenne. Les non-signataires incluent des pays enclavés, mais aussi les États-Unis, Israël et la Turquie.

³ Voir notamment les affaires devant le Tribunal international du droit de la mer : *MOX Plant* (Irlande c. Royaume-Uni, 2001) et *Land Reclamation by Singapore in and around the Straits of Johor* (Malaisie c. Singapour, 2003).

⁴ Accord aux fins de l'application des dispositions de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982 relatives à la conservation et à la gestion des stocks de poissons dont les déplacements s'effectuent tant à l'intérieur qu'au-delà de zones économiques exclusives (stocks chevauchants) et des stocks de poissons grands migrateurs, adopté à New York le 4 août 1995.

⁵ Accord relatif à l'application de la Partie XI de la Convention des Nations unies sur le droit de la mer du 10 décembre 1982, adopté à New York le 28 juillet 1994, entré en vigueur le 28 juillet 1996.

⁶ Accord se rapportant à la Convention des Nations unies sur le droit de la mer et portant sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale (BBNJ), adopté à New York le 19 juin 2023, disponible sur la base des traités des Nations unies.

⁷ Un autre exemple notable est celui de la création du concept d'État archipelagique portée par l'Indonésie.

l'humanité applicable à la Zone internationale des fonds marins.

Si la CNUDM fournit un cadre juridique général applicable aux activités susceptibles d'affecter le milieu marin, sa mise en œuvre repose sur une pluralité d'institutions, de mécanismes et de régimes spécialisés développés à différentes échelles (voir la Figure 1). Cette gouvernance particulièrement dense contraste avec les fortes continuités écologiques, biogéochimiques et climatiques de l'océan profond. Elle s'inscrit également dans un contexte de diplomatie océanique renouvelée, comme en témoigne la troisième Conférence des Nations unies sur l'océan qui s'est tenue à Nice en juin 2025, à travers la centralité croissante de l'océan dans l'action environnementale internationale (Guilloux *et al.*, 2025). Dans ce paysage, l'incertitude scientifique demeure un défi majeur : les capacités humaines d'exploration et d'exploitation progressent souvent plus rapidement que les connaissances disponibles relatives au fonctionnement écologique de l'océan profond et, plus généralement, aux dynamiques du milieu marin, ainsi qu'aux conséquences des activités humaines sur ce milieu et ses écosystèmes (Sanders, Tamburini *et al.*, 2025).

Les usages maritimes de l'océan profond

Les activités maritimes encadrées par des institutions internationales spécialisées à fonction régulatrice

L'exploration et l'exploitation des ressources minérales de la Zone, patrimoine commun de l'humanité

L'encadrement juridique des ressources minérales marines dépend étroitement de leur localisation au sein des différents espaces maritimes définis par la CNUDM. Les ressources situées dans les espaces sous juridiction nationale, y compris sur le plateau continental étendu, relèvent principalement de la compétence des États côtiers. À l'inverse, les ressources de la Zone, c'est-à-dire du fond des mers et des océans et de leur sous-sol au-delà des limites de la juridiction nationale, sont soumises à un régime international spécifique. Dans ce cadre, les règles élaborées par l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), institution créée par la CNUDM pour organiser et contrôler les activités menées dans la Zone, occupent une place centrale.

Les travaux de l'AIFM sont aujourd'hui largement consacrés à l'élaboration du règlement relatif à l'exploitation des ressources minérales dans la Zone, dont l'adoption requiert un consensus entre les États membres. Les négociations de ce texte cristallisent des intérêts et des priorités parfois difficiles à concilier, qu'il s'agisse des enjeux stratégiques et géopolitiques liés à l'accès aux ressources minérales, des effets potentiels sur les pays producteurs terrestres, de la mise en œuvre du patrimoine commun de l'humanité et du partage des bénéfices qui en découle, ou encore de la protection du milieu marin. À cet égard, le caractère inédit d'une

exploitation minière industrielle des grands fonds marins et les importantes incertitudes scientifiques qui demeurent quant à ses conséquences environnementales plaident en faveur d'une application rigoureuse de l'approche de précaution.

La pêche ou le « grand bazar » institutionnel

La gouvernance des ressources halieutiques profondes s'est construite progressivement depuis les années 1950, au gré de l'expansion des flottilles industrielles et de l'identification de nouvelles ressources halieutiques. Elle repose sur une cinquantaine d'organisations régionales ou sectorielles dont le mandat varie : de mécanismes de partage de données et de coordination à une compétence régulatrice (selon les critères, entre seize et dix-huit Organisations Régionales de Gestion des Pêches ou ORGP ont un mandat régulateur). Certaines sont compétentes pour des espèces particulières comme les thonidés hautement migrateurs, tandis que d'autres gèrent l'ensemble des ressources halieutiques d'une zone donnée, y compris certaines espèces profondes. Leurs mandats, leurs pouvoirs de conservation, leurs mécanismes de contrôle et leurs périmètres géographiques diffèrent considérablement.

Cette superposition de mandats produit une mosaïque complexe de règles et d'acteurs. Malgré l'extension progressive du réseau des ORGP et le développement de mécanismes d'échanges entre elles, y compris sous l'égide du Comité des Pêches (COFI) de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), des lacunes géographiques et fonctionnelles subsistent, en particulier pour certaines ressources profondes, certaines zones de haute mer ou certains impacts écosystémiques de la pêche. Cette architecture éclatée rend ardue l'adoption d'approches cohérentes à l'échelle des écosystèmes et illustre les défis persistants de la gouvernance de l'océan profond. Les ambitions d'ouverture de nouvelles pêcheries dans la zone mésopélagique font par exemple l'objet de vives discussions.

L'utilisation des ressources génétiques marines : un nouvel enjeu technoscientifique

Les ressources génétiques marines (RGM) constituent un enjeu de recherche-développement, d'innovation biotechnologique et de compétition scientifique et économique. Les négociations relatives aux RGM ont été marquées par une opposition entre, d'une part, les États attachés à la préservation des libertés de la haute mer, dont la liberté de recherche scientifique marine, et, d'autre part, de nombreux États en développement et émergents plaidant pour un partage plus juste et équitable des avantages monétaires et non monétaires issus de leur utilisation. Les progrès du séquençage génétique, de la bioinformatique et des données de séquençage numérique ont renforcé ces débats en transformant les modalités d'accès aux ressources génétiques marines, la valeur scientifique et économique se déplaçant progressivement des échantillons biologiques eux-mêmes vers les données et connaissances qui en sont issues.

Jusqu'à l'adoption de l'Accord BBNJ de 2023, les RGM ne faisaient l'objet d'aucun cadre juridique et institu-

tionnel spécifique dans les zones ne relevant pas de la juridiction nationale. L'Accord traduit un compromis entre ces différentes positions. Sans remettre en cause les libertés de la haute mer consacrées par la CNUDM, il prévoit des mécanismes de notification, de traçabilité et de partage des avantages relatifs aux RGM et aux données de séquençage numérique, ainsi qu'une architecture institutionnelle exerçant des fonctions régulatrices, scientifiques et de coordination. Il établit ainsi un cadre juridique et institutionnel destiné à encadrer certaines activités liées à l'utilisation des RGM dans les zones ne relevant pas de la juridiction nationale.

Les activités maritimes sans institution internationale régulatrice spécialisée

La recherche scientifique marine : une activité essentielle pour la gouvernance de l'océan profond

La liberté de la recherche scientifique marine est l'une des grandes libertés de la haute mer consacrées par la CNUDM, qui l'encadre par des obligations de coopération, de partage des connaissances et de protection du milieu marin. Longtemps associée à la production de connaissances, la recherche scientifique marine occupe une place essentielle dans la gouvernance de l'océan profond.

Elle bénéficie de cadres importants de coopération institutionnelle, notamment à travers la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO, dont le mandat couvre la coopération scientifique, l'observation et le développement des capacités océaniques. La COI ne dispose toutefois pas d'un mandat régulateur. L'encadrement de la recherche scientifique marine repose ainsi largement sur des mécanismes de coopération, des recommandations techniques et des bonnes pratiques élaborées ou diffusées par des organisations non gouvernementales, des programmes et des réseaux scientifiques internationaux.

Les câbles sous-marins : un régime ancien au cœur des interdépendances numériques contemporaines

Souvent peu visibles dans les débats publics, les câbles sous-marins constituent des infrastructures essentielles au fonctionnement des sociétés contemporaines. Support de la quasi-totalité des communications numériques mondiales, ils traversent les grands fonds marins depuis plus d'un siècle et demi. Leur encadrement international remonte notamment à la Convention internationale pour la protection des câbles sous-marins de 1884, tandis que leur régime juridique repose aujourd'hui principalement sur les libertés reconnues par la CNUDM en matière de pose, d'entretien et de réparation dans les espaces maritimes internationaux.

Bien que l'encadrement des câbles sous-marins ne dépende pas d'une organisation intergouvernementale spécialisée exerçant une fonction régulatrice comparable à celle d'autres secteurs de la gouvernance maritime, le Comité international de protection des câbles (CIPC) créé en 1958, joue un rôle central dans la gouvernance de cette activité. La plupart des membres du CIPC incluent les nombreux propriétaires privés de

ces câbles, dont, par exemple Google ou Amazon. Ce mode de gouvernance invite à s'interroger sur sa capacité à faire face à l'importance stratégique des câbles sous-marins et aux enjeux de sécurité, de vulnérabilité géopolitique et de coexistence avec d'autres usages de l'océan profond qu'ils soulèvent.

Les réponses aux changements climatiques : des activités à l'interface des cadres de gouvernance du climat et de l'océan

Depuis que le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a mis en avant les techniques d'élimination du dioxyde de carbone (CO₂) qui doivent être envisagées pour lutter contre les effets du changement climatique, en complément de réductions drastiques des émissions de gaz à effet de serre (GES), une nouvelle vague de soutien s'est établie. Celle-ci inclut le développement d'une nouvelle réglementation internationale pour la recherche relative aux activités de géoingénierie marine (GIM) telles que la fertilisation de l'océan, l'alcalinisation de l'océan et l'immersion de biomasse. Seules les activités de recherche qui remplissent les critères pour être de nature scientifique et légitime devraient être autorisées.

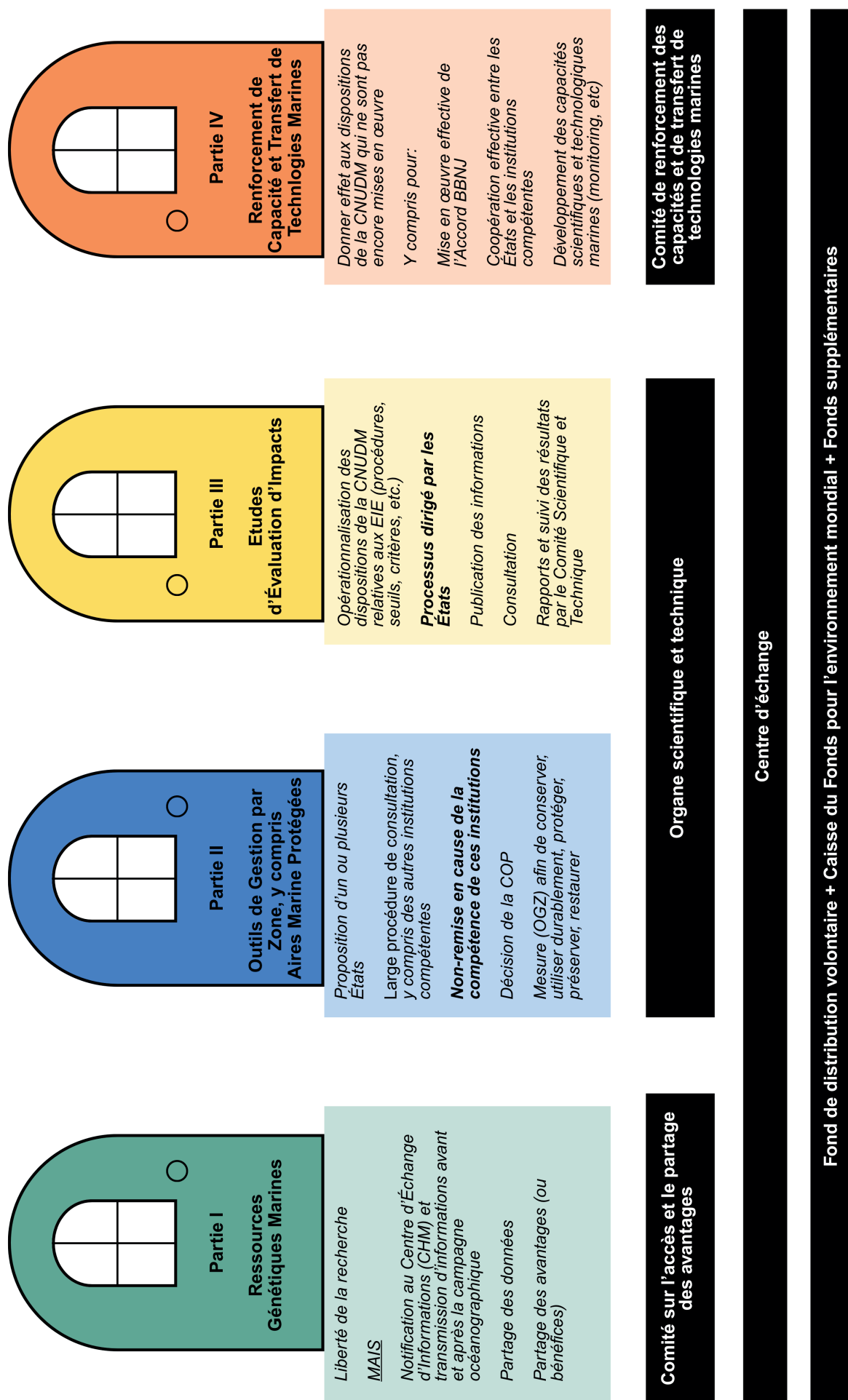
Les activités de séquestration de CO₂ (CCS) dans les formations géologiques sous-marines sont réglementées par les mêmes institutions, à savoir les organes directeurs de la Convention de Londres de 1972 et son Protocole de Londres de 1996 sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets et autres matières. Bien que les règles relatives au CCS et à la GIM n'aient pas encore de caractère obligatoire, elles ont néanmoins une certaine autorité dans le cadre de la CNUDM, en tant que standards et pratiques des États, mais aussi pour empêcher le remplacement d'une pollution par une autre ou le déplacement d'un préjudice ou un risque d'un lieu à un autre.

L'accord BBNJ : nouveau trait d'union institutionnel ?

Centré sur la conservation et l'utilisation de la biodiversité de la haute mer et de la Zone, l'Accord BBNJ ne remet pas en cause la compétence des institutions et des instruments existants. En revanche, l'une des ambitions de ce nouveau traité est de renforcer la coopération et la coordination institutionnelles, ainsi que l'intégration des enjeux scientifiques dans la gouvernance des activités ayant lieu dans les espaces marins internationaux ou susceptibles d'avoir des effets sur ceux-ci (Young et Friedman, 2018).

Pour ce faire, l'Accord BBNJ met en place de nouveaux mécanismes, dont un centre d'échange d'informations destiné à faciliter l'accès aux informations pertinentes pour sa mise en œuvre. Cependant, le champ d'application de l'Accord BBNJ ne s'étend pas à la protection de l'environnement marin en général. Il est limité à quatre ensembles d'activités lorsqu'elles sont déployées dans les zones ne relevant pas de la juridiction nationale ou lorsqu'elles sont susceptibles d'avoir des impacts sur ces zones : partage juste et équitable des avantages découlant de l'utilisation des RGM, adoption d'outils de

Figure 2 : Champ d'application matérielle des principaux éléments de l'accord BBNJ (Source : Youna LYONS, ACOPS, 8 juin 2026).



gestion par zone, y compris les aires marines protégées, évaluation des études d'impact environnemental et renforcement des capacités et transfert de technologies marines (voir la Figure 2). Cependant, les organes établis par l'Accord BBNJ ne disposent que de pouvoirs régulateurs limités. Ces pouvoirs sont en outre limités par l'exigence de ne pas porter atteinte ni compromettre l'exercice, par les institutions existantes de gouvernance de l'océan, de leurs compétences respectives (Mossop et Freestone, 2025 ; Leclerc et Robin, à paraître).

Conclusion et perspective

L'océan profond n'est pas un espace de non-droit. Les difficultés qu'il soulève résident moins dans une absence de règles que dans leur articulation, leur coordination et leur mise en œuvre effective dans un contexte d'incertitudes scientifiques persistantes, d'intérêts nationaux divergents et de tensions géopolitiques. À l'image d'une « rose des vents » normative, sa gouvernance résulte d'une pluralité de principes, d'intérêts, de régimes et d'orientations parfois contradictoires (Delmas-Marty, 2016).

À l'heure du retour des rivalités de puissance et de certaines formes de repli souverain, le droit international conserve une fonction fondamentale d'énonciation, de stabilisation, de sécurité juridique et de mise en délibération des règles, des usages et des responsabilités liés à l'océan profond, même lorsque les équilibres politiques demeurent contestés. Sa force dépend cependant de l'usage qui en est fait, dès lors que l'usage entretient la faculté. Si l'on comprend l'intérêt que peuvent avoir certaines puissances dominantes à substituer des instruments politiques au droit lorsque celui-ci est contraignant, une telle évolution n'est en revanche pas dans l'intérêt des autres États, en particulier de ceux qui sont attachés à un ordre international fondé sur le droit. Cette approche conduit à éroder les fondements normatifs de l'ordre international au profit d'opportunités politiques éphémères, au risque de fragiliser les garanties juridiques dont ces États bénéficient eux-mêmes.

Un défi majeur réside dans l'articulation entre les continuités écologiques, biogéochimiques et climatiques qui caractérisent l'océan et les cadres de gouvernance historiquement construits autour d'activités, de ressources ou de secteurs spécifiques. Cette différence de perspective est aussi de nature épistémique. Les connaissances scientifiques mettent en évidence les multiples interconnexions qui structurent les écosystèmes marins et la nécessité de les prendre en compte. Les institutions internationales, quant à elles, se sont principalement construites pour encadrer des activités humaines déterminées, en tenant compte de la complexité des organisations humaines liées à ces activités, ainsi que de leurs particularités techniques. Cela explique en partie l'organisation sectorielle de la gouvernance de l'océan. Cette pluralité de régimes et d'institutions ne constitue pas nécessairement une faiblesse : elle offre aussi une diversité d'outils juridiques susceptibles

d'être mobilisés et articulés de manière complémentaire en fonction des enjeux considérés.

La capacité à mobiliser ces outils de manière cohérente et effective dépend toutefois du développement de recherches associant sciences naturelles, sciences humaines et sociales et gouvernance. Comprendre les interactions entre processus écologiques, innovations technologiques, usages maritimes et cadres institutionnels constitue en effet une condition essentielle à la mise en œuvre éclairée du droit de la mer. Cette approche intégrée se trouve d'ailleurs au cœur de la Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030), qui vise à renforcer les liens entre production des connaissances, gouvernance et prise de décision (COI UNESCO, 2021). Dans cette perspective, la fragmentation peut certes être source de tensions ou de complexité (Koskenniemi, 2006), mais elle peut également offrir une forme d'agilité institutionnelle permettant d'adapter les réponses juridiques à des enjeux scientifiques, environnementaux et géopolitiques en constante évolution.

Dans un contexte marqué par l'essor rapide des connaissances scientifiques et des capacités technologiques, la gouvernance de l'océan profond dispose d'un arsenal normatif déjà substantiel. Les stratégies nationales contemporaines illustrent d'ailleurs la manière dont cet arsenal peut être mobilisé à des fins variées. Ainsi, la stratégie française de maîtrise des fonds marins s'appuie sur les institutions et mécanismes issus du droit international de la mer afin de répondre à des objectifs de connaissance, de surveillance, de protection des infrastructures critiques et de préservation de la liberté d'action dans les espaces maritimes d'intérêt stratégique (ministère des Armées, 2022). Loin de se substituer au droit, les considérations géopolitiques et stratégiques s'inscrivent souvent dans les cadres juridiques existants ou cherchent à les faire évoluer. L'effectivité de cet ensemble normatif dépendra toutefois de la capacité des États, des organisations internationales et des communautés scientifiques à produire, partager et mobiliser les connaissances nécessaires à sa mise en œuvre, ainsi que de la volonté politique de faire vivre les obligations existantes et de coordonner les régimes applicables.

Bibliographie

- BOYLE A. (2005), "Further Development of the Law of the Sea Convention: Mechanisms for Change", *The International and Comparative Law Quarterly*, 54(3), pp. 563-584.
- CHAUMETTE P. (2021), *Droits maritimes*, Paris, Dalloz.
- COMMISSION OCÉANOGRAPHIQUE INTERGOUVERNEMENTALE DE L'UNESCO (COI) (2021), *La Décennie des Nations unies pour les sciences océaniques au service du développement durable (2021-2030) : Plan de mise en œuvre*, Paris, UNESCO.
- DELMAS-MARTY M. (2016), *Aux quatre vents du monde. Petit guide de navigation sur l'océan de la mondialisation*, Paris, Seuil.
- FORTEAU M. et THOUVENIN J.-M. (dir.) (2017), *Traité de droit international de la mer*, Paris, Pedone.

- GUILLOUX B., LYONS Y., RICHARD J., BAILLY D. (2025), « La troisième Conférence des Nations unies sur l'océan (UNOC3) : la diplomatie bleue au service de l'action environnementale ? », *Revue juridique de l'environnement*, vol. 50, n°4, pp. 717-720.
- HEIDAR T. (dir.) (2020), *New Knowledge and Changing Circumstances in the Law of the Sea*, Leiden/Boston, Brill Nijhoff, Publications on Ocean Development, vol. 92.
- KOSKENNIEMI M. (2006), *Fragmentation of International Law: Difficulties Arising from the Diversification and Expansion of International Law*, New York, United Nations.
- LECLERC T., ROBIN D.-S. (dir.) (à paraître), L'Accord sur la biodiversité marine des zones ne relevant pas de la juridiction nationale (BBNJ), Mare & Martin.
- MANN BORGESE E. (1978), "A Constitution for the Oceans: Comments and Suggestions Regarding Part XI of the Informal Composite Negotiating Text", *San Diego Law Review*, vol. 15, pp. 371-394.
- MINISTÈRE DES ARMÉES (2022), *Stratégie ministérielle de maîtrise des fonds marins*, Paris, ministère des Armées.
- MOSSOP J. & FREESTONE D. (dir.) (2025), *The Agreement on Marine Biodiversity of Areas Beyond National Jurisdiction: Commentary and Analysis*, Oxford, Oxford University Press.
- NORDQUIST M.H. (dir.) (1985-2013), *United Nations Convention on the Law of the Sea 1982: A Commentary*, Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 7 vol.
- PROELSS A. (dir.) (2017), *United Nations Convention on the Law of the Sea. A Commentary*, Munich, C.H. Beck / Oxford, Hart Publishing.
- ROTHWELL D.R., ELFERINK A.G.O., SCOTT K.N. & STEPHENS T. (dir.) (2015), *The Oxford Handbook of the Law of the Sea*, Oxford, Oxford University Press.
- SANDER S., TAMBURINI C., GOLLNER S., GUILLOUX B., PAPE E., HOVING H.J., LEROUX R., ROVERE M., SEMEDO M., DANOVARO R. & NARAYANASWAMY B.E. (2025), *Deep Sea Research and Management Needs*, Future Science Brief n°12, MUÑIZ PINIELLA A., KELLETT P., ALEXANDER B., RODRIGUEZ PEREZ A., BAYO RUIZ F., TEODOSIO M.C. & HEYMANS J.J. (éd.), Ostende, European Marine Board.
- TANAKA Y. (2019), *The International Law of the Sea*, Cambridge, Cambridge University Press.
- UNITED NATIONS, DIVISION FOR OCEAN AFFAIRS AND THE LAW OF THE SEA (2026), *The Third World Ocean Assessment (WOA III)*, United Nations, New York.
- YOUNG M.A. & FRIEDMAN A. (2018), "Biodiversity Beyond National Jurisdiction: Regimes and Their Interaction", *AJIL Unbound*, 112, pp. 123-128.

Les grands fonds marins : le point de vue du Comité des parties prenantes de l'Ifremer

Par Diane VASCHALDE
Ifremer

Céline LIRET
Océanopolis

Christophe SIRUGUE
Nausicaa

Geneviève PONS
Europe Jacques Delors

& Sébastien TREYER
IDDRI

Le Comité des parties prenantes de l'Ifremer (CPP) a été sollicité pour relayer les enjeux de connaissances relatifs aux grands fonds marins, afin d'alimenter les questionnements de la recherche. Après avoir *interviewé* une quinzaine d'acteurs, le CPP rappelle l'importance d'explicitier la définition de l'océan profond au sein d'un dialogue avec la société, et se positionne en faveur de la connaissance, à condition de mener une réflexion collective sur les finalités de l'exploration. Le CPP propose ensuite des questionnements à l'attention de la communauté scientifique, notamment sur la sobriété, l'observation de long terme, l'argumentaire économique, les temporalités en jeu, la place des non-humains et les frontières de l'innovation technologique.

Le Comité des parties prenantes de l'Ifremer amené à s'exprimer sur les grands fonds marins

Le Comité des parties prenantes de l'Ifremer

Le Comité des parties prenantes (CPP) de l'Ifremer est une instance de gouvernance consultative dédiée au dialogue avec des acteurs non académiques. Il s'inscrit en complémentarité avec le comité scientifique d'une part, et le comité Éthique en Commun partagé entre l'IRD, le CIRAD, l'INRAE et l'Ifremer d'autre part. Le CPP est composé de vingt membres qui y siègent *intuitu personae* et bénévolement, après avoir été sélectionnés suite à un appel à candidatures. Cinq collèges¹ permettent d'assurer une diversité de profils et de regards sur les travaux scientifiques de l'Ifremer (associations

et ONG, entreprises, élus et représentants des territoires, travailleurs du maritime, citoyens engagés).

Le dialogue entre l'institut et le CPP est généralement formalisé en trois temps :

- le président-directeur général de l'Ifremer saisit le CPP autour d'un sujet pour lequel un regard des parties prenantes est nécessaire – le règlement intérieur prévoit que le CPP puisse également s'auto-saisir ;
- le CPP mène sa réflexion, dont l'aboutissement est une note d'orientation et de dialogue ;
- et la direction générale de l'Ifremer répond au CPP pour expliciter les suites qui seront données aux différents points et recommandations.

Depuis sa création en 2021, le CPP a travaillé sur l'engagement citoyen dans les projets scientifiques, la place de la science dans les directives marines européennes, la recherche pour une aquaculture durable et

¹ La composition du Comité des parties prenantes de l'Ifremer est accessible ici : <https://www.ifremer.fr/fr/comite-des-parties-prenantes>

Encadré : Les auditions réalisées

Monde académique, recherche, sciences

- Michel Badré, comité Éthique en Commun INRAE-Cirad-Ifrémer-IRD
- Valérie Chavagnac (CNRS), Pierre-Yves Le Meur (IRD), Pierre-Marie Sarradin (Ifrémer), co-porteurs du PEPR
- Fanny Karatchodjoukova, Christian Tamburini, MIO, CNRS
- William Fenical, SCRIPPS (USA)
- Bleuenn Guilloux, Université La Rochelle

ONG, activistes, militants

- Ludovic Frère-Escoffier, WWF France
- Camille Étienne, activiste

Organisation intergouvernementale

- Clément Chazot, Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN)

État, administrations, gouvernement

- Olivier Jacob, directeur général des outre-mer
- André Guiol, sénateur du Var

Secteur privé, entreprises, bureaux d'études

- Jean-Marc Sornin, Abyssa
- Jean Aude, Alcatel Submarine Networks
- Vincenzo De Gennaro et Claudia Sorgi, SBL
- Frédéric Renaudeau, pôle mer Bretagne Atlantique et Christian Planes, pôle mer Méditerranée
- Francis Vallat, Cluster Maritime Français
- Nicola Fuzzati, Alix Toribio, Fanny Benhadda, Chanel

innovante, l'océan profond et les recherches relatives à la pêche².

La saisine sur l'océan profond et les grands fonds marins

Le plan d'investissement France 2030 dédie l'objectif 10 aux grands fonds marins, avec une enveloppe totale de 350 millions d'euros, pour trois axes : la recherche, le développement de technologies innovantes et des missions d'exploration. Dans ce cadre, en 2025, à l'aune du lancement du Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) « Grands fonds marins : connaissances pour fonder des usages et une protection durables », co-porté par le CNRS, l'IRD et l'Ifrémer, le CPP a été saisi pour relayer les questions de

connaissance considérées comme importantes par les parties prenantes, afin de pouvoir ensuite les traduire en questionnements de recherche. La saisine s'inscrit également dans le contexte de l'élaboration de la feuille de route d'un des quatre thèmes prioritaires de l'Ifrémer, « Connaître l'océan profond ».

Une quinzaine d'auditions auprès de différents acteurs ont été menées, sous la forme d'entretiens semi-directifs, afin de recueillir leurs perceptions, leurs attentes et leurs enjeux de connaissance relatifs aux grands fonds marins – les acteurs rencontrés sont mentionnés dans l'Encadré. Les membres du CPP ont ensuite collaboré avec David Wahl, auteur dramaturge, pour une mise en perspective sensible des travaux, puis la note d'orientation et de dialogue³ a été publiée

² Les travaux du Comité des parties prenantes de l'Ifrémer sont rendus publics sur le site internet de l'institut : <https://www.ifremer.fr/fr/saisines-et-avis>

³ La note d'orientation et de dialogue produite par le CPP sur l'océan profond et les grands fonds marins est accessible ici : <https://www.ifremer.fr/fr/l-ocean-profond-et-les-grands-fonds-marins>

quelques jours avant la Conférence des Nations unies sur l'Océan (UNOC3). Cet article en résume les principaux éléments.

Les grands fonds marins : des réalités et des imaginaires à explorer...

Des milieux peu connus et des conceptions variées

« Les grands fonds marins, on pensait que c'était un désert, et plus on explore, plus on découvre sa richesse », André Guiol, sénateur. « Il y a 50 ans, on pensait encore qu'il n'y avait pas de vie, alors qu'elle est incroyablement foisonnante et sûrement fragile ! », Francis Vallat, fondateur du Cluster Maritime Français et président de l'association Expédition Septième Continent. Ces verbatim reflètent un point de départ très clair, à la fois un constat scientifique et une réalité partagée par les différents acteurs interrogés : les grands fonds marins restent largement inconnus.

À partir de ce constat, deux autres éléments deviennent une évidence et guident les travaux du CPP de l'Ifremer : la volonté d'acquérir de nouvelles connaissances et celle de préserver ces écosystèmes. Comme c'est un milieu peu connu et convoité, face aux « risques contrefactuels »⁴ (comité d'éthique du CNRS, 2021), il est nécessaire d'appliquer le principe de précaution.

Avant d'exposer les enjeux de connaissances qui entourent les grands fonds marins, il est utile de les définir. Si pour l'Ifremer la définition est claire, avec comme limite la pénétration de la lumière (généralement en-deçà de 200 mètres de profondeur), les acceptions des parties prenantes interrogées sont multiples. La plupart se positionne sur un gradient de profondeur et/ou par rapport à un usage humain, par exemple « Les grands fonds marins pour nous, c'est le *seabed* », « Au-delà de 1 000 ou 1 500 m, limite à partir de laquelle l'ensouillage complet du câble n'est plus possible », « Là où on trouve ce qui est le plus discuté, le plus polémique : les nodules, les sulfures, les encroûtements cobaltifères ». La colonne d'eau n'est jamais citée explicitement.

Les grands fonds marins, reflets de plusieurs paradoxes

« Le paradoxe de ce nouveau monde, tout comme l'Atlantide, c'est qu'à peine découvert, il menace d'être englouti ». Dans *La Vie profonde*, David Wahl (2023)

⁴ Extrait de l'avis n°2021-41 du COMETS : « Les actions de prévention se justifient quand les risques de certaines technologies sont bien identifiés pour le temps présent. Mais il peut arriver que les incertitudes soient trop grandes pour que la science puisse évaluer les risques pour l'avenir. On parle alors de risques contrefactuels en ce sens qu'ils ne reposent pas sur des faits d'observation. Ainsi est apparu le principe de précaution, qui concerne des menaces potentielles et hypothétiques pour le futur. L'idée à la base de ce principe est que les incertitudes ne doivent pas retarder l'adoption de mesures pour éviter ou ralentir une dégradation probable de l'environnement sur le long terme. ».

expose cette ambiguïté propre à l'océan profond, face au désir d'exploitation alors même que moins de 0,001 % des fonds marins ont été vus par l'œil humain (Ifremer, 2025). D'autres paradoxes sont énoncés par le CPP, car les discussions avec les différents acteurs auditionnés mettent en exergue les grands fonds marins à la fois comme un espace de tensions, et comme un espace qui rend possible un ensemble de connexions.

Les différentes tensions repérées sont de plusieurs natures. Tout d'abord, sur le plan des émotions, les grands fonds marins suscitent à la fois de la peur, du mystère, de la fascination et de l'émerveillement. Ensuite, parce qu'ils sont peu connus, lointains, difficiles d'accès, et en même temps créateurs d'images, le rapport à la découverte et à l'aventure est difficile à cerner : il existe un décalage entre la représentation d'un espace vierge, une *terra incognita* et le fait que l'humain y soit en réalité déjà présent (exploitation d'hydrocarbures, pêche, pollution plastique, contaminants...). Enfin, la question du besoin en ressources dites « rares » est sujet à controverse : pour certains, les ressources minérales marines sont indispensables à la transition énergétique et numérique, quand pour d'autres ce besoin est loin d'être avéré (SINTEF, 2022).

Les grands fonds marins sont également au cœur d'un certain nombre de connexions. En premier lieu, scientifiquement, parce que les écosystèmes profonds jouent un rôle majeur dans les grands cycles biogéochimiques, et que la colonne d'eau est source de vie, de liaison entre le fond et la surface, et lieu de passage ou d'habitat pour de nombreuses espèces. En deuxième lieu, technologiquement, parce que les grands fonds marins permettent les communications à travers le monde, grâce au réseau de câbles sous-marins. Enfin, les développements technologiques permettant d'étudier l'océan profond peuvent être d'intérêt pour les sphères civiles et militaires.

... mais pour quelles finalités, et pour répondre à quels enjeux ?

De l'importance du processus pour qualifier les enjeux

Le comité Éthique en Commun INRAE-Cirad-Ifremer-IRD a questionné les enjeux de connaissances sur les grands fonds marins dans le contexte des négociations sur leur potentielle exploitation⁵. Les travaux du CPP s'inscrivent dans le même esprit : l'ignorance n'est pas préférable à la connaissance. En revanche, « c'est l'utilisation de la connaissance qui doit attirer notre questionnement », nous devons trouver des manières pour « garantir un vrai rôle à la science, et qu'elle ne soit pas utilisée contre ce qu'elle découvre » (David Wahl).

L'exploration seule, dénuée de finalité autre que la seule découverte de ce que l'on ignore encore, est utile dans la mesure où elle enrichit les connaissances et

⁵ Il s'agit de l'avis n°16 du comité Éthique en commun, « Exploration, exploitation et préservation des milieux inconnus et très faiblement anthropisés. Cas particulier des grands fonds marins », accessible ici : <https://doi.org/10.13155/106724>

les facultés de compréhension. Le comité Éthique en Commun INRAE-Cirad-Ifrémer-IRD recommande pour cela à la fois de « ne pas se retrouver enfermés dans des enjeux utilitaristes » (Michel Badré) et d'interroger des parties prenantes de manière la plus large possible.

Ce processus de réflexion collective, en lui-même, sur les enjeux de la recherche et de l'exploration est crucial pour garantir un cadre de découverte qui respecte le principe de précaution.

La multiplicité des possibles et leurs limites

Le sujet des ressources minérales marines a systématiquement pris beaucoup de place dans les échanges avec les acteurs⁶, et sans sous-estimer l'importance de cet enjeu, le CPP rappelle que les thématiques à embrasser sont beaucoup plus variées, à l'instar de ce qui est prévu dans le PEPR « Grands fonds marins » (biodiversité, usages, gouvernance). À partir des auditions, le CPP a donc proposé des catégories d'enjeux de connaissance, qui ont une certaine perméabilité. Elles participent à un processus de reconnaissance de ces milieux, car la connaissance, c'est déjà une forme de reconnaissance.

Il y a tout d'abord le besoin de connaître pour nommer, raconter, cartographier, inventorier. Enrichir les connaissances sur les espèces, les interactions entre les différents compartiments, la topographie, etc., est au cœur de la recherche scientifique, même pour des acteurs non académiques : « Un enjeu de connaissance sur les grands fonds marins ? La connaissance en elle-même. » (Nicola Fuzzati, Chanel). *In fine*, ces acquisitions de connaissances peuvent s'avérer utiles pour l'être humain par inadvertance : c'est le concept de sérendipité. Dans les grands fonds marins, les seize espèces de poissons dits « ultra-noirs » influencent les améliorations des télescopes et des panneaux solaires (Fondation de la Mer, 2023). Vient ensuite la connaissance pour comprendre : les flux et le stockage de carbone, l'influence des courants de fond dans le changement climatique, les interactions entre l'atmosphère et les fonds marins, ainsi que la caractérisation des impacts d'une potentielle exploitation des ressources minérales figurent parmi les problématiques qui reviennent le plus souvent.

L'acquisition de connaissances sur l'océan profond révèle aussi des besoins de développements techniques et semble nécessaire pour stimuler l'innovation technologique. Certaines technologies d'engins sous-marins autonomes ont d'ailleurs été transférées de l'Ifrémer vers la Défense, notamment pour augmenter leur capacité de surveillance des câbles sous-marins⁷. Il y a également l'aspect d'innovation à partir du vivant, que ce soit pour du biomimétisme ou des biotechnologies. L'un des aspects les plus consensuels des fina-

lités de l'exploration est d'ailleurs celui à des fins de potentielle découverte pour des usages médicaux.

Tout un panel d'enjeux de connaissances exprimés par les acteurs auditionnés fait référence aux usages. Si certains se rattachent à des usages actuels (par exemple, les câbles sous-marins), la plupart des questionnements concernent des usages qui pourraient se développer (par exemple, la géo-ingénierie marine ou l'exploitation des ressources minérales marines). Dans ce contexte, la connaissance est acquise pour anticiper et encadrer les usages existants et potentiels.

De manière transversale à ces enjeux, le CPP positionne également la connaissance comme un élément géostratégique d'une part, et éthique d'autre part – l'un et l'autre pouvant être connectés. Quand les connaissances rendent l'invisible visible, cela vient bousculer les activités de la Défense. La protection des câbles sous-marins⁸, et bien sûr les questions relatives aux ressources minérales marines et aux hydrocarbures revêtent elles aussi un caractère géostratégique puisqu'elles mettent en jeu des questions de souveraineté. Souvent en conséquence de cette portée géostratégique, et dans un contexte où le milieu naturel et ses interactions avec les usages restent peu connus, les parties prenantes interrogées ont mentionné le droit à la science (article 27 de la déclaration universelle des droits de l'homme), l'importance de rendre les données accessibles à tous, et la place des générations futures dans les débats sur le besoin en ressources minérales.

Conclusions et perspectives

En conclusion, le CPP a formalisé certains enjeux de connaissances sous la forme de questionnements à l'interface sciences-société :

- Sur la sobriété : quelles recherches dans un monde où les ressources sont finies et où il est question de nouvelles activités extractives ?
- Sur l'observation de long terme : quelles infrastructures de recherche pour une meilleure connaissance et un suivi sur le long terme des différents paramètres physiques, chimiques, géologiques, biologiques, sociaux, politiques, économiques... ?
- Sur les temporalités : le temps des formations géologiques, le temps des processus biologiques, le temps des activités humaines. Comment ces temporalités s'imbrquent-elles, comment définissent-elles les rapports du vivant avec le non-vivant ?
- Sur l'argumentaire économique : une exploitation des ressources minérales marines serait-elle rentable, à quelles conditions ?
- Sur l'innovation technologique : quelle est la frontière d'innovation qui peut entraîner une dynamique ? Quelles alternatives pour stimuler l'innovation sans exploitation ?

⁶ L'analyse bibliométrique de Agusdinata et Robbins (2025) montre que le nombre de publications sur le sujet suit une croissance exponentielle entre 1994 et 2023, avec un premier bond en 2011 puis en 2018.

⁷ Pour une réflexion géostratégique sur les câbles sous-marins, voir les travaux de Camille Morel (Morel, 2023).

⁸ « Lorsque les câbles sous-marins sont endommagés, c'est toute une économie qui peut être mise par terre » (André Guiol, sénateur).

- Sur les non-humains : quelles seraient les modalités de leur participation à ces débats essentiels à leur survie ? Il est question des droits de la nature, de démarches artistiques, et de réflexions philosophiques.
- Sur la notion d'appropriation : elle a un fort potentiel transdisciplinaire de par ses résonances en droit, en sociologie, en économie, et peut englober des questions de partage des avantages tout autant que de légitimité des prises de décisions actuelles vis-à-vis des générations futures.

« L'océan profond, c'est une matrice des imaginaires » (David Wahl), et pour sortir du débat « exploration vs exploitation », le CPP préconise de stimuler les imaginaires et de continuer à explorer l'océan profond, en prenant soin de définir les finalités de la connaissance. Mais finalement, parce qu'il s'agit d'explorer pour connaître, il pourrait également s'agir de réexplorer pour découvrir. Les échantillons provenant des grandes profondeurs sont déjà nombreux dans les laboratoires, dans les souchothèques et les carothèques : peut-on

s'y replonger pour se surprendre, pour créer de nouvelles connaissances ?

Bibliographie

AGUSTINADA D.B. & ROBBINS C.S. (2025), "Sustainability issues of deep-sea mining: a bibliometric review and research priorities", *Environmental Research Letters*, 20(10), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae013f>

COMITÉ ÉTHIQUE EN COMMUN (INRAE-Cirad-Ifremer-IRD) (2024), Avis n°16 « Exploration, exploitation et préservation des milieux inconnus et très faiblement anthropisés - Cas particulier des grands fonds marins », <https://doi.org/10.13155/106724>

COMITÉ D'ÉTHIQUE DU CNRS, COMETS (2021), Avis n°2021-41 « Science, risques, et principe de précaution », mars 2021, <https://comite-ethique.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/05/Avis-2021-41.pdf>

IFREMER (2025), Note de réflexion « Les grands fonds marins entre exploration et exploitation future : état des lieux des connaissances et enjeux », mai 2025, https://www.ifremer.fr/sites/default/files/2025-06/note-de-reflexion_grands_fonds.pdf

FONDATION DE LA MER (2023), « Les grands fonds marins : quels choix stratégiques pour l'avenir de l'humanité ? », <https://www.fondationdelamer.org/wp-content/uploads/2023/12/Les-Grands-Fonds-Marins.pdf>

MOREL C. (2023), *Les câbles sous-marins*, Paris, CNRS Éditions.

SINTEF (2022), "The Future is circular – Circular economy and critical minerals for the green transition", <https://hdl.handle.net/11250/3032049>

WAHL D. (2023), *La Vie profonde – Une expédition dans les abysses*, Éditions Arthaud.

25 ans de pilotage stratégique portuaire en France : trois inflexions paradigmatiques (1999-2025)

Par **Éric FOULQUIER**

Université de Bretagne Occidentale, UMR LETG

Et **Antoine FRÉMONT**

Conservatoire National des Arts et Métiers (Le Cnam)

En 1999, la Cour des comptes publie un rapport sur la politique portuaire française qui marque le point de départ d'une profonde mutation. Ce signal d'alerte sur la perte de compétitivité des ports nationaux débouche sur la réforme de 2008, qui succède aux deux grandes réformes de 1965, sur les ports autonomes, et de 1992 sur la manutention. Ce qui distingue les deux périodes 1965-1999 et 1999-2025, c'est l'accélération des transformations nécessaires face à un contexte de plus en plus complexe et instable. Depuis 1999, plus d'une vingtaine de rapports publics ont éclairé l'État sur différents aspects de la réponse qu'il conviendrait de donner à ces problématiques successives. S'ils ne constituent pas en soi une politique maritime nationale, ces rapports fournissent un socle solide de connaissances. L'analyse de cette littérature grise permet d'observer les transformations progressives du paradigme portuaire. Trois séquences peuvent être mises en évidence afin d'observer l'évolution de l'idée du port : la modernisation du port infrastructure, la délicate affirmation du port aménageur, l'émergence du port entrepreneur.

Dans les sphères qui portent une réflexion sur l'espace portuaire français, académique et décisionnelle, il est assez usuel de considérer que la France n'a pas réellement de politique maritime. L'affirmation est intéressante, car elle implique que l'on définisse un tant soit peu ce qui fait une politique. De notre point de vue, deux conditions peuvent être avancées. Une politique fixe d'abord un cap, des objectifs et s'organise selon une stratégie. Pour ce faire, elle se base sur des constats, des états des lieux, identifie des problèmes que la stratégie doit permettre de résoudre. Elle se donne ensuite les moyens, techniques, réglementaires, légaux et surtout financiers pour répondre à ses ambitions. Sans budget dédié, sans investissement, sans cadre juridique, qu'est-ce qu'une politique, si ce n'est une déclaration d'intention ? Au regard de ces deux conditions, il est délicat d'affirmer que la France ne disposerait pas d'une politique maritime, pour le moins d'une doctrine. Répond-elle aux besoins, satisfait-elle aux ambitions, sont d'autres questions.

Comme le souligne Adeline Descamps dans un article du *Journal de la Marine marchande* de 2020 à propos de la publication du rapport Vaspert (2020), « faut-il que l'on n'ait pas tout dit pour être encore capable d'écrire 133 pages sur ce que devraient être les ports français ? »¹. Depuis 1999, et la publication du rapport

de la Cour des comptes sur la politique portuaire française, plus d'une vingtaine de rapports et d'études ont été produits par différentes instances de l'administration publique. Si la France n'a peut-être pas de politique maritime, l'État dispose au moins d'une solide connaissance de son espace portuaire et maritime, patiemment construite depuis 25 ans par une foule d'experts, ingénieurs et parlementaires, capables de diagnostiquer et de recommander aux gouvernants qui se succèdent à la tête du pays. L'adoption par le Conseil interministériel de la mer (Cimer) en 2021 de la nouvelle stratégie portuaire n'a semble-t-il pas épuisé le débat, puisqu'en 2026 se prépare un nouveau rapport parlementaire sur la compétitivité des ports de commerce français.

Au fil des pages de cette volumineuse production, deux états de fait apparaissent de manière récurrente. Le premier constate l'érosion continue des parts du marché portuaire européen des organismes français. De là, se fonde la problématique de la compétitivité d'abord, de l'attractivité ensuite. En 25 ans, la part des ports français dans le flux total des trafics européens est passée de 10,7 à 6,6%, tandis que celle des ports voisins se maintenait peu ou prou dans les mêmes eaux statistiques. Si la part des ports français sur le marché des conteneurs s'est à peu près maintenue entre 6 et 5 % sur la période, celle des ports belges et espagnols a gagné plus de deux points, établissant leur part respective à 11 et 16 %. On pourrait se reconforter en soulignant l'érosion des ports hollandais, italiens et allemands sur ce segment, si leur

¹ « Un énième rapport sur la compétitivité portuaire », *Journal de la Marine Marchande*, 3 juillet 2020.

part de marché ne s'établissait pas autour des 12 % en 2024. De ce constat découle un second questionnement récurrent : comment cette érosion des trafics portuaires est-elle possible lorsque l'on considère les atouts géographiques du pays ? La France dispose en effet de trois façades maritimes, qui la positionnent à la fois à l'entrée et à la sortie des débouchés continentaux, atlantiques et méditerranéens. Le pays peut également faire valoir un maillage portuaire relativement dense et particulièrement divers sur le plan fonctionnel. Ces atouts géographiques hexagonaux se conjuguent à ceux liés aux territorialités ultramarines pour interroger la maritimité nationale.

La confrontation de ces deux constats rappelle qu'il ne saurait exister de déterminisme géographique. Les dynamiques territoriales résultent toujours de la projection de volontés politiques. Ainsi, la politique portuaire et maritime de la France ne saurait être bien fondée sans des stratégies industrielles et d'aménagement du territoire pour l'accompagner. Plusieurs rapports de la période nous rappellent ces deux truismes dans la pensée portuaire : pas de volumes sans acteurs industriels et sans infrastructures pas de volumes.

Au regard de la finesse et de la profondeur des analyses menées, il serait particulièrement présomptueux, voire téméraire, de prétendre apporter ici des considérations supplémentaires sur ce qu'il serait opportun de faire ou de ne pas faire. En revanche, il nous semble

utile de mettre en évidence la trajectoire sémantique, conceptuelle, et donc idéologique, que trace l'ensemble de ces rapports. Faut-il le rappeler, les ports de commerce ne sont que la matérialisation sociotechnique des besoins des sociétés humaines qui les animent et les gouvernent. En ce sens, ils s'adaptent en permanence aux nouvelles conditions que les mutations sociétales leur commandent.

De ce point de vue, les 25 dernières années nous paraissent consacrer de profonds changements du paradigme portuaire. Or, ces changements manifestent une accélération sensible du réformisme portuaire. Si la séquence précédente (1965-2000) a aussi connu ses chocs conjoncturels, une seule réforme fondamentale, celle de la manutention portuaire (1992), nous semble avoir perturbé la donne de la gouvernance portuaire française. La fréquence des remises en question lors des 25 dernières années ordonne un changement de rythme et oblige à s'interroger sur les éléments qui les motivent.

Plusieurs réformes marquent ce premier quart du XXI^e siècle : la réforme de 2008, la décentralisation de 2004 puis de 2015, la formulation de deux stratégies nationales (2013, 2021). La période est marquée par plusieurs chocs conjoncturels : la crise financière de 2008-2009, le Brexit, la crise du Covid-19, le retour de la guerre en Europe et dans le monde. Sur le plan structurel, la question écologique marque fortement les

Tableau : Trajectoire sémantique du paradigme portuaire français (1999-2025) (Source : Auteurs).

Période	Paradigme	Objectifs poursuivis		Processus engagés
		Socio-économique	Environnement	
1999-2008	Port infrastructure	Compétitivité Adaptation gigantisme Guichet unique Informatique portuaire Gouvernance	Déchets Pollution Qualité des eaux Compensation Relation ville-port	Modernisation Terminalisation Communalisation Dématérialisation
2009-2017	Port aménageur	Fiabilité Performance foncière Logistique et arrière-pays Attractivité	Report modal Qualité de l'air Labélisation	Massification Intégration Coordination
2018-2025	Port entrepreneur	Souveraineté Production énergétique Résilience Innovation Numérique	Décarbonation Biodiversité Conservation	Réindustrialisation Transition écologique Entreprenarisation
Les séquences proposées ne sont pas des phases qui se succèdent et se substituent à la précédente. Elles sont cumulatives. La mutation du modèle portuaire s'opère selon un façonnement progressif, sans qu'une étanchéité idéologique s'installe entre les séquences.				

mutations du paradigme portuaire. Avançons l'idée que ces mutations s'établissent en trois séquences cumulatives qui façonnent progressivement la mutation du modèle portuaire (voir le Tableau).

1999-2008 : la modernisation du port infrastructure publique

Cette séquence est celle de la prise de conscience de la nécessaire réforme du vieux port autonome. En 1999, puis en 2006, la Cour des comptes s'alarme de la perte de compétitivité des ports français. Leur performance est jugée médiocre au regard des atouts géographiques du pays. Il est urgent d'en moderniser non seulement les infrastructures, mais également les modalités de gestion. La modernisation portuaire passe par la libéralisation. Il s'agit en quelque sorte d'une mise en conformité avec le modèle dominant de gestion portuaire qui, à l'époque, s'installe progressivement à l'échelle mondiale. Depuis le début des années 1990, ce modèle, dit du port propriétaire, ou *landlord port*, est promu par les instances financières internationales (Banque mondiale, Fonds monétaire international). Avec la fin de la guerre froide, une refonte complète du modèle de soutien économique aux pays émergents s'opère, dans un contexte géopolitique marqué par le triomphe des idées néolibérales.

L'État est un propriétaire domanial, il doit se faire stratège, mais n'est pas la structure pertinente d'exploitation de ce domaine, qu'il doit concéder à des opérateurs dont c'est le métier. Ce processus de terminalisation (Martel, 2015 ; Slack, 2017) invite à l'hybridation du modèle portuaire public, en ouvrant la porte des terminaux aux opérateurs privés, *via* la mise en œuvre des conventions de terminal. Comme le soulignent Jason Monios et Gordon Wilmsmeier (2016), mais aussi Jean Derby, Valérie Lavaud-Le Tilleul et Francesco Parola (2013) et Romuald Lacoste et Marie Douet (2013), le réformisme portuaire participe d'un processus dichotomique. Il s'articule entre la convergence vers un modèle global de gestion portuaire et l'adaptation aux spécificités géo-historiques du port où il s'applique. Ainsi, en France, si la réforme a largement été pensée pour résoudre les problématiques havraises et marseillaises, elle n'en concerne pas moins l'ensemble de la communauté portuaire nationale, qui doit s'adapter à l'émergence de nouveaux acteurs, dans des contextes toujours singuliers.

Un processus de communalisation² doit s'opérer à la faveur de la mise en œuvre d'une nouvelle gouvernance dans laquelle les acteurs privés, parfois internationaux, mais également les acteurs territoriaux doivent trouver leur place, dans les conseils de développement en particulier mais pas exclusivement. Dans la reconfi-

² Dans les espaces portuaires, cette construction d'un tissu de liens, formel et informel, se joue dans le dialogue interprofessionnel. Celui-ci s'établit dans le contexte quotidien de l'exercice des métiers et des fonctions, et dans des différentes scènes de la gouvernance portuaire. Ces liens fabriquent l'idée de l'existence d'une communauté, plus ou moins soudée autour d'intérêts communs et partagés.

guration des rapports de force au sein de la communauté portuaire, les vieilles unions maritimes jouent un rôle clé.

Au-delà de ce profond changement dans la gouvernance portuaire nationale, la question centrale reste celle des emprises infrastructurelles et de leur adaptation à la massification des flux, orchestrés par l'émergence de la Chine comme atelier du monde et par le développement de la conteneurisation. La période est alors aux extensions portuaires, à l'optimisation des opérations de dragage. Depuis le sommet de Rio de 1992, le concept de développement durable contraint à placer l'extension de ces emprises dans une gestion un tant soit peu intégrée de l'environnement portuaire (Carter *et al.*, 2024). La loi-cadre sur l'eau des années 2000, la crise foncière entre ville et port qui s'installe durablement depuis les succès des opérations de reconquête urbaine de Bilbao, de Baltimore, ou d'ailleurs, ainsi que la question des pollutions maritimes et portuaires, notamment du point de vue de la gestion des déchets et des rejets industriels, placent l'expansionnisme portuaire, terrestre et nautique, tout en haut de la liste des préoccupations environnementales des ports membres de l'ESPO³ qui, depuis 1996, interroge régulièrement ses adhérents sur l'évolution de leur politique en la matière. Le projet Port 2000 est le premier grand projet à expérimenter le débat public, voulu par la loi Barnier de 1995. Il s'inscrit dans la séquence qui règne désormais sur les opérations d'aménagement : il faut évaluer, réduire et compenser. Les espaces naturels portuaires deviennent une ressource politique. Le port infrastructure glisse progressivement vers le port aménageur, une forme d'autorité territoriale devant assumer des fonctions d'animations du *cluster* d'activités adossées à ses fonctions d'interface (Lévêque, 2012).

Enfin, la séquence est marquée par l'Acte II de la décentralisation (2004) dans lequel l'État législateur laisse le soin aux collectivités locales de désigner par elles-mêmes le niveau territorial adéquat de gouvernement des ports anciennement d'intérêt national (Chouquet, 2024). Il en résulte la plus grande confusion au sein d'un paysage portuaire, devenu celui des ports souvent qualifiés de secondaires. Cette deuxième vague de décentralisation engage une forme de « désordre institutionnel » (Guillaume, 2016), une atomisation des modalités de gouvernance qui révèle en creux l'absence de lignes claires concernant la stratégie de l'État en matière de développement portuaire (Debie et Lavaud-Le Tilleul, 2010).

2009-2017 : le port aménageur, la délicate affirmation d'une autorité territoriale

La séquence s'ouvre sur l'émergence d'une doctrine environnementale dans le sillage du Grenelle de l'environnement (2009). La question écologique et l'idée que les composantes écosystémiques puissent faire res-

³ European Seaports Organization.

sources, s'arriment durablement à la politique publique. Pour les ports, la décarbonation devient un horizon, la gestion de leur domaine naturel et la régulation de leurs émissions une stratégie.

La séquence est marquée par une mise en ordre de la gouvernance du système portuaire national. À l'exception notable de Saint-Pierre-et-Miquelon, les ports ultramarins deviennent eux aussi des Grands Ports Maritimes. En 2015, les ports décentralisés sont majoritairement confiés aux Régions. Seuls Nice, Toulon, et Quimper échappent à cette règle. Même si le dispositif de conventionnement de terminal reste l'apanage des GPM, l'ensemble portuaire français bascule dans le modèle du port propriétaire.

Deux échelles de décision doivent être accordées à l'expression d'une autorité territoriale. La première s'inscrit dans la maîtrise de la domanialité, dans le sillage de la réforme de 2008. Le port infrastructure est devenu un gestionnaire de foncier. Il est maître en son domaine. Sa performance s'inscrit dans l'optimisation de ce dernier, intimement liée à l'attractivité qu'il réussit ou non à construire pour valoriser au mieux ses terrains. Alors que la question écologique s'affirme, cette faculté foncière conduit de nombreux établissements à renouveler l'expansionnisme portuaire de la période précédente. En d'autres termes, si la question de l'empreinte participe progressivement de la problématique portuaire, la question des emprises ne semble pas être frappée d'obsolescence, et contribue parfois à mettre en évidence des logiques contradictoires. La nouvelle condition portuaire s'établit ainsi, au gré d'injonctions souvent paradoxales, entre valorisation foncière et préservation d'espaces naturels, entre recherche d'effets de synergie logistique pour satisfaire les besoins économiques de la nation et moindres impacts territoriaux des activités de transport.

En 2013, la France se dote d'une première stratégie nationale. Elle est suivie 3 ans plus tard par quatre rapports qui développent l'idée de façade, structurée par des axes : Seine, Nord, Rhône et Atlantique. Cette réflexion n'est pas nouvelle. Dès 2010, le rapport de Rolland Blum⁴ s'intéresse aux conditions de la multimodalité, fluviale et ferroviaire, en lien avec les interfaces portuaires et place la question des arrière-pays au cœur du débat. Le Grand Port Maritime se doit d'être un « architecte logistique » (Vidalies, 2015), l'animateur d'un espace plus vaste, un guichet intégré capable de servir le flux sur de longues distances.

Il ne s'agit plus tellement de faire vivre une communauté, mais plutôt de construire une place. La sémantique n'est pas neutre. La communauté est un dialogue, la place une destination. La mise en œuvre progressive des conseils de coordination interportuaire va dans le sens d'une vision plus intégrée du développement portuaire. L'élaboration progressive de la structure

HAROPA⁵ illustre ce mouvement. Le port doit jouer un rôle clé dans la structuration de son arrière-pays, pour se mettre à l'échelle d'un avant-pays qui s'est globalisée et qui pose des problématiques de gouvernance mondiale (Frémont, 2019).

On comprend que la deuxième acception du terme « autorité territoriale » se joue sur deux espaces de connexion distincts qui dépassent le seul périmètre portuaire : terrestre d'abord, au sein duquel l'État joue un rôle décisif en matière d'aménagement et de grands travaux ; maritime ensuite, là où les armateurs sont rois. « La reconquête portuaire se joue davantage à terre qu'en mer » (Vidil, 2015). Si le port se doit d'avoir une stratégie, une grande partie des décisions qui en conditionnent la performance lui échappe. Il en résulte un certain déficit d'autorité de l'autorité portuaire (Foulquier et Maugeri, 2014), pour le moins une forme de vulnérabilité face à des contingences sur lesquelles il n'a pas forcément la main.

2018-2025 : l'avènement du port entrepreneur

Dans le monde académique, les travaux doctoraux de Nicolas Mat (2015) introduisent l'idée du métabolisme portuaire dans un contexte de gestion des flux carbonés dans le port de Marseille, en s'appuyant sur les concepts de l'écologie industrielle. L'idée de compétitivité portuaire à l'âge de la décarbonation invite au renouveau de la pensée systémique.

Plusieurs chocs contribuent à cette évolution du paradigme portuaire. Le Brexit, le Covid-19, le retour de la guerre en Europe rappellent le port à l'exercice de la souveraineté. Mais l'appel au réarmement des ports lancé dans le rapport Vaspart (2020) qui succède au plaidoyer pour une plus forte compétitivité portuaire du rapport Maurey-Vaspart (2019), s'inscrit aussi dans une multiplication des crises caniculaires. Selon les sources ministérielles, la France a connu 49 canicules depuis 1947, dont 32 se sont produites après l'an 2000. L'urgence est aussi climatique. La reconquête d'une souveraineté portuaire ne peut s'affranchir de la décarbonation. Celle-ci passe par l'innovation qui se joue en partie dans la réindustrialisation.

Le concept du port entrepreneur apparaît pour la première fois, semble-t-il, dans un rapport de l'IGF/CGEDD de 2018⁶. Le port entrepreneur doit être proactif. Il fédère les initiatives, favorise les implantations, engage des investissements. Il ne produit plus seulement des bilans, mais construit surtout des *business plans* pour convaincre les banques d'accompagner ses initiatives. L'espace portuaire redécouvre le concept de zone industrialo-portuaire. Avec l'accélération des technologies numériques, il se pense en un vaste système

⁴ « La desserte ferroviaire et fluviale des grands ports maritimes - Propositions en faveur de l'amélioration du report modal dans le cadre des pré et postacheminements de marchandises des ports de Marseille, du Havre et de Dunkerque », Rapport au Premier ministre, 2010.

⁵ La fusion dans la structure HAROPA ne se réalise de manière effective qu'en 2021, mais le rapprochement entre les ports du Havre, de Rouen et de Paris a démarré bien avant.

⁶ « La transformation du modèle économique des grands ports maritimes », IGF/CGEDD.

de flux et de données. Il devient métabolique, car il ne cesse d'être territorial et ambitionne l'optimisation.

En 2021, la France se dote d'une stratégie nationale portuaire et d'une Loi Climat et résilience. La réindustrialisation portuaire se joue sur l'énergie, comme dans les années 1960. Avec le port entrepreneur, c'est une inflexion majeure qui s'opère, celle de la rupture avec le modèle économique fossile. Le port doit devenir un *hub* énergétique décarboné, se penser comme un levier de la transition vers une économie libérée de la contrainte pétrolière. Dans la synthèse qu'il livre lors d'un séminaire sur le bilan de la stratégie nationale portuaire en février 2025, Geoffroy Caude résume en quatre concepts clés le défi du nouveau paradigme portuaire : robustesse, résilience, souveraineté, exemplarité. Robustesse, car le port doit résister, faire face aux menaces, en construisant une agilité collective. Résilience, car le port doit s'adapter aux crises, se doter des infrastructures nécessaires pour se relever des chocs. Souveraineté, car le port est un élément clé de l'économie nationale qui conditionne elle-même un positionnement géopolitique. Exemplarité, car la fiabilité portuaire dépend aussi du dialogue social et de son acceptabilité dans son territoire d'insertion.

Conclusion

Les ports sont des objets sociétaux. Ils sont un reflet de nous-mêmes dans la mesure où leur existence est conditionnée par nos besoins. En d'autres termes, ils ne constituent pas des objets autonomes, déconnectés de la trajectoire territoriale dans laquelle ils s'insèrent. À l'instar de la société, ils sont aujourd'hui inscrits dans une tension entre croissance et écologisation. Si le terme de transition est politiquement utile, il ne saurait répondre à l'urgence de la transformation nécessaire du modèle traditionnel dans lequel les ports se sont épanouis depuis la fin du XIX^e siècle, celui des volumes et des masses, pour l'essentiel carbonés. S'agit-il de faire évoluer le modèle pour amortir progressivement les crises, sans profondes remises en cause ? Ou s'agit-il de parier sur l'avènement d'une tout autre trajectoire ?

L'histoire nous apprend que la vie des ports s'est souvent jouée sur ces prises d'initiatives. « Dans toute prise de décision d'invention ou de réactivation existe toujours une forme de pari sur l'avenir résultant d'un imaginaire où la qualité de l'anticipation peut se disputer avec l'utopie » (Llinares et Saupin, 2020, p. 9). Cette tension interroge immanquablement le concept de développement, dont la nature peut prendre des formes très diverses, plus ou moins stables dans le temps au regard des ressources nécessaires pour pouvoir l'assumer. La réponse est évidemment politique, car le projet portuaire ne peut se départir de la destinée sociétale. Elle est malheureusement aussi et surtout financière, car les investissements nécessaires pour accompagner ce changement du paradigme portuaire sont colossaux. Or, de ce point de vue, l'histoire nous rappelle encore que la politique portuaire française n'a pas toujours été à ce rendez-vous.

Bibliographie

- CARTER C. & DROUAUD F. (2024), "Territory, ecological transition and the changing governance of ports", *Territory, Politics, Governance*, n°3, pp. 374-394.
- CHOUQUET M. (2024), « Contribution à la définition de la notion de port territorial : l'approche juridique », *Les Cahiers Scientifiques du Transport*, n°82, pp. 9-19.
- DEBRIE J. & LAVAUD-LE TILLEUL V. (2010), *La décentralisation portuaire : réformes, acteurs, territoires*, Paris, L'Harmattan.
- DEBRIE J., LAVAUD-LE TILLEUL V. & PAROLA F. (2013), "Shaping port governance: the territorial trajectories of reform", *Journal of Transport Geography*, n°27, pp. 56-65.
- FOULQUIER E. & MAUGERI S. (2014), « La notion de communauté portuaire », in *Gouverner les ports de commerce à l'heure libérale*, Paris, CNRS Éditions, pp. 75-123.
- FRÉMONT A. (2019), « Le transport maritime depuis 1945 : facteur clé de la mondialisation », *Entreprise & Histoire*, n°94, pp. 16-29.
- GUILLAUME J. (2016), « Contraintes globales et gouvernance locale : pour un premier bilan des ports décentralisés en France », *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, n°93-4, pp. 350-368.
- LACOSTE R. & DOUET M. (2013), "The adaptation of the landlord port model to France's major seaports: a critical analysis of local solutions", *Maritime Policy & Management*, 2013, vol. 40, n°1, p. 27-47.
- LÉVÊQUE L. (2012), « Le nouveau rôle des autorités portuaires dans l'adaptation des clusters aux enjeux de la globalisation », *L'Espace Politique*, n°16, ss.p.
- LLINARES S. & SAUPIN G. (2020), « Ports nouveaux : processus de création et de récréation portuaire », in *Ports nouveaux. Création et renaissance du XV^e au XXI^e siècle*, Rennes, Presses Universitaires de Rennes, pp. 7-25.
- MAT N. (2015), *Dynamiques de transition dans les territoires portuaires : apport de l'écologie industrielle et territoriale aux processus d'adaptation vers une société bas-carbone*, thèse de doctorat, École Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 248 pages.
- MARTEL H. (2015), « De la réforme portuaire de 2008 à la création d'HAROPA : un nouveau départ pour les ports français », *Annales des Mines – Réalités industrielles*, novembre 2015, pp. 54-58, <https://www.anales.org/ri/2015/ri-novembre-2015/RI-11-2015-Article-MARTEL.pdf>
- MONIOS J. & WILMSMEIER G. (2016), "Between path dependency and contingency : new challenge for geography of port system", *Journal of Transport Geography*, n°51, pp. 247-251.
- SLACK B. (2017), "The terminalisation of seaports", in *Ports, cities, and global supply chains*, Londres, Routledge, p. 57-66.
- VIDALIES A. (2015), « Une ambition forte pour les ports français », *Annales des mines – Réalités industrielles*, novembre 2015, p. 3, https://www.anales.org/ri/2015/ri-novembre-2015-avant_propos.pdf
- VIDIL R. (2015), « Quelle place pour les ports français dans les nouvelles liaisons maritimes internationales ? », *Annales des Mines – Réalités industrielles*, novembre 2015, pp. 7-9, <https://www.anales.org/ri/2015/ri-novembre-2015/RI-11-2015-Article-VIDIL.pdf>

Cartographie de la recherche publique océanique française

Par Hervé MOULINIER

Président d'honneur du Pôle Mer Bretagne Atlantique

Et Antoine DOSDAT

Ancien directeur du Centre Bretagne de l'Ifremer

Caractériser l'adéquation des forces de recherche publiques françaises par rapport aux enjeux de l'Océan, suppose de disposer d'une cartographie préalable de ces forces. C'était l'ambition de l'étude publiée en 2021, et c'est l'objectif de sa mise à jour en cours. L'étude s'appuie sur une méthodologie nouvelle, précisant mieux le périmètre thématique de ces recherches et construisant l'inventaire à partir des données des évaluations publiques de chacune des entités de base, de façon à réduire le besoin et les biais d'enquête. Sur la base de ces données, on peut affirmer que les sciences et techniques de la mer (STM) mobilisent dans 222 entités un effectif de l'ordre de 7 000 personnels scientifiques en équivalents temps plein. Le présent article revient sur les résultats de cet inventaire et les différents types d'exploitation qui ont pu en être faits depuis lors. Il souligne tout l'intérêt de disposer de cet inventaire géolocalisé pour évaluer les politiques publiques en STM.

Pourquoi une cartographie des sciences océaniques ?

Si la question se pose, ce n'est pas seulement en raison des usages habituels : savoir quelles sont les forces globales et locales en présence, savoir qui fait quoi et où, et pouvoir en faire une analyse stratégique. C'est également parce que l'exercice demande au préalable de définir ce que sont les sciences océaniques (encore appelées sciences et techniques de la mer, STM). Certaines classifications, dont celles du classement de Shanghai, se trouvent être restreintes à l'océanographie. Or, l'océan étant un milieu, toutes les disciplines qui lui sont appliquées ou qui en dépendent, méritent la qualification d'océaniques : qu'elles soient sciences de la vie et de la Terre, sciences et technologies d'ingénierie, mais aussi sciences humaines et sociales qui contribuent à la compréhension des enjeux et problématiques liés à l'océan et aux solutions pour y faire face.

Le présent article exploite une étude publiée en 2021, qui est en cours de mise à jour. Un inventaire actualisé sera disponible dans quelques mois.

Origine de cette étude

Elle répondait à une attente exprimée par le CNML¹ qui souhaitait disposer de cet inventaire comme base de mesure des effets réels de la mobilisation de la communauté maritime face aux enjeux environnementaux, économiques et sociaux relatifs à l'océan.

¹ CNML : Conseil National pour la Mer et les Littoraux.

Il s'agissait en particulier de pouvoir affirmer l'ambition de la France et le rôle qu'elle entendait jouer dans le volet maritime du Green Deal européen et dans la décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable.

L'étude, dont les résultats vont être présentés ci-après, a permis à de nombreux établissements ou entités de recherche de se positionner. Elle permettra aussi d'évaluer le déploiement de la SNML dans son objectif 8 : « Soutenir l'effort de recherche et de connaissances au service des politiques publiques maritimes et des territoires », nous évoquerons à la fin de l'article un certain nombre d'initiatives qui s'inscrivent dans ce cadre.

Pour cette étude, une méthodologie nouvelle a été mise en œuvre. En effet, les approches antérieures, basées sur l'effectif des grands organismes et instituts, étaient connues pour laisser de côté des forces de recherche réparties dans de nombreux établissements d'enseignement supérieur, ou dans des disciplines appliquées au domaine océanique mais non identifiées comme marines ou maritimes.

Une méthodologie en 8 étapes

L'originalité de la méthode est de s'appuyer sur les données issues des évaluations opérées, pour le compte du MESRI², par le Hcéres³, et de réduire

² MESRI : ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

³ Hcéres : Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur.



Figure 1 : Schéma synoptique de la méthode.

le travail d'enquête à des compléments. Le rapport d'étude complet est consultable à l'adresse <https://doi.org/10.13155/76327>

La Figure 1 en décrit les étapes : l'identification des entités publiant dans le domaine a été l'étape clé, conduite par le service d'Information Scientifique et Technique de l'Ifremer, par combinaison des sources et d'une équation de recherche bibliométrique dédiée. Les entités sont réparties en trois classes :

- 100 % maritimes ;
- partiellement maritimes, dont une partie est explicitement dédiée au maritime ;
- contributives, qui appliquent leur compétence transverse au maritime.

Les nombreuses informations attachées à ces entités ont ensuite été extraites des évaluations menées par le Hcéres et des bases de données ouvertes. Elles ont

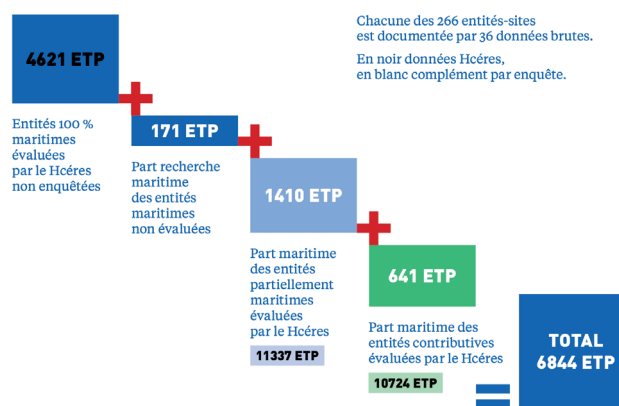


Figure 2 : Résultats bruts de l'inventaire.

été complétées par enquête pour les entités partiellement maritimes ou contributives et pour les entités non évaluées.

Les résultats

Effectifs totaux

Les effectifs recensés dans la Figure 2 apparaissent comme étant deux fois plus nombreux que les estimations habituellement utilisées.

Sur un total de près de 7 000 équivalents temps plein (ETP), qui représentaient 4,2 % des effectifs de la recherche publique française⁴, les effectifs provenant des entités qui ne sont pas dédiées à 100 % au maritime représentent environ 2 000 équivalents temps plein (ETP).

Ce résultat inattendu s'explique à la fois par l'exhaustivité de la méthode et par une définition extensive

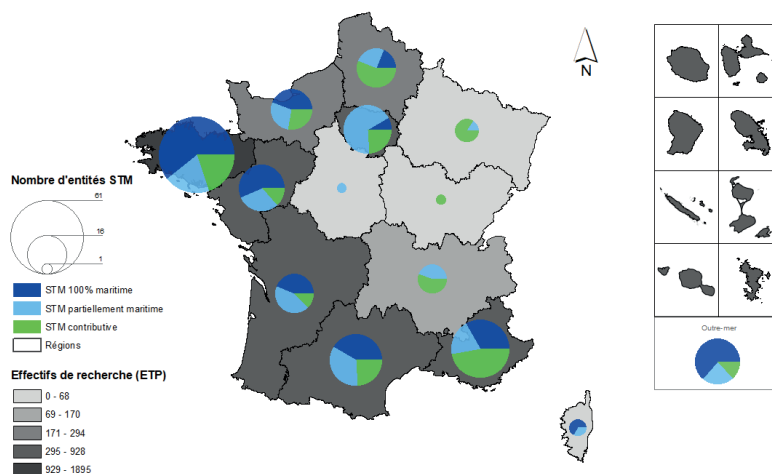


Figure 3 : Nombre d'entités et d'effectifs de recherche en sciences et techniques de la mer par région (Source : Étude STM ; réalisation Ifremer / SISMER, juin 2020).

⁴ Voir la fiche 35 du rapport annuel du MESRI (2022, données 2017) et le rapport d'étude STM, détaillé – en particulier son annexe 2. Les effectifs étaient alors de 163 000 ETP, chercheurs et personnel de soutien technique à la recherche.

des sciences et techniques de la mer, qui concerne ici toutes les dimensions des milieux marins et toutes les activités maritimes.

L'ensemble des données est centralisé dans une base de données accessible au public par le portail Sextant⁵ de l'Ifremer. Nous présentons ci-dessous un échantillon des extractions possibles.

Répartition géographique des entités⁶

La Figure 3 visualise le nombre d'entités (par la taille du disque) de chaque type (par la couleur des secteurs) dans chacune des régions. L'intensité de gris de chaque région rend compte de l'effectif total attaché à ces entités dans la région. Plus il y a de bleu foncé dans le disque, plus la région est spécialisée dans le maritime. La Bretagne, les Pays de la Loire et les Outre-mer ont ainsi une majorité « d'entités 100 % maritimes » ; dans les autres régions, la recherche maritime est le fait d'entités moins spécialisées.

Les effectifs inventoriés dépendent de 222 entités de recherche, soit 266 « entités-site » en comptant celles qui sont situées sur plusieurs sites géographiques. Ces entités sont géolocalisées et les données peuvent donc être consolidées à différentes échelles.

Taille des entités

Si 15 entités dépassent 100 ETP, la majorité des entités ont un effectif compris entre 10 et 100 ETP.

On trouve l'essentiel des effectifs 100 % maritimes dans des entités de 20 à 300 personnes.

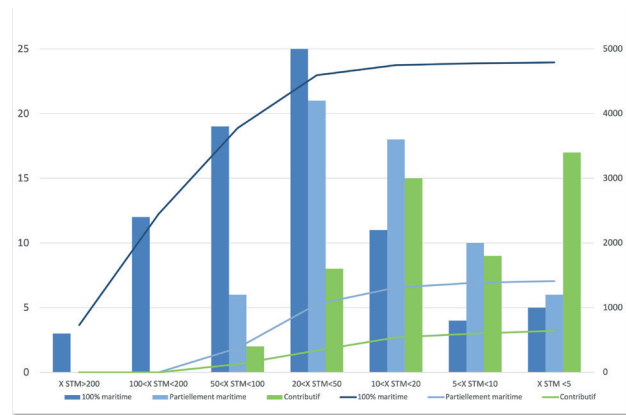


Figure 4 : Nombre d'entités par taille (X STM) et par type (axe gauche) – Effectif ETP cumulé par type d'entité (axe droit).

Les effectifs des entités partiellement maritimes ou contributives sont concentrés dans des entités de 10 à 50 personnes. Elles fournissent des contributions unitaires, logiquement plus réduites, mais dont le cumul est significatif.

Répartition géographique des effectifs

La Figure 5 présente les effectifs dans la métropole ou la ville principale du département qui accueille l'institut ou l'université autour desquels s'est développée la compétence en STM. À l'exception notable des régions parisienne et toulousaine, il s'agit de villes littorales.

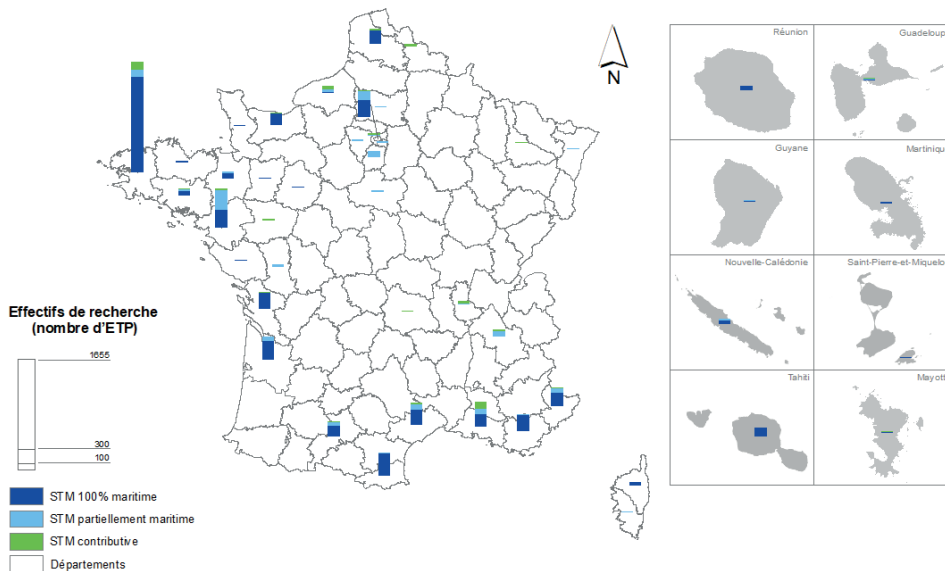


Figure 5 : Effectifs de recherche en sciences et techniques de la mer par département.

⁵ Sextant est le portail d'accès aux données maritimes nationales et internationales gérées par le service SISMER de l'Ifremer : <https://sextant.ifremer.fr/>. Sextant permet d'accéder à chaque entité par un point sur la carte auquel sont attachées toutes les données, exportables au format « .csv ».

⁶ L'entité est le niveau d'organisation le plus détaillé évalué par le Hcéres (UMR par exemple).

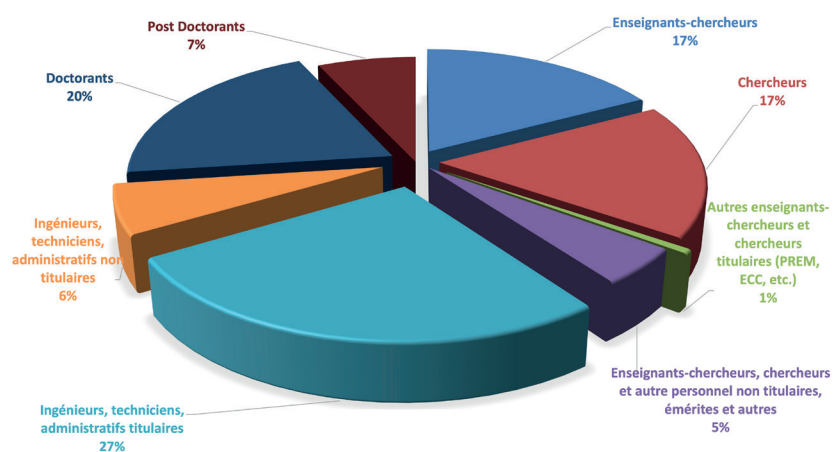


Figure 6 : Répartition des effectifs STM par catégorie de personnel.

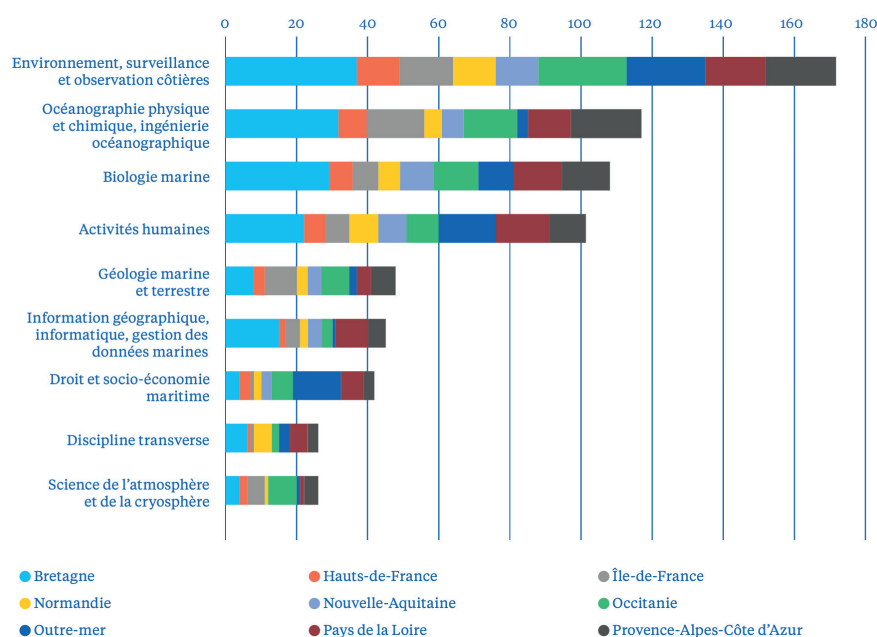


Figure 7 : Occurrence de citation des thématiques simplifiées dans chacune des 9 principales régions.

Au global, 46 % des effectifs sont localisés sur la façade atlantique, 27 % sur la façade méditerranéenne et les 27 % restants se répartissent entre la Manche – mer du Nord, les Outre-mer et la région parisienne.

Répartition des effectifs par catégorie de personnel de recherche

Les évaluations du Hcéres identifient dans le détail les catégories de chercheurs selon leur statut, leur fonction et leur contrat de travail. La Figure 6 les regroupe en 8 catégories agrégées. Les effectifs sont comptabilisés en ETP, comme dans le rapport annuel du MESRI.

Le rapport d'étude détaillé analyse les pourcentages des différentes catégories par rapport à la moyenne nationale dans chacune des régions.

Analyse des thématiques principales de recherche

Une classification maritime inspirée de la segmentation britannique⁷, plus adaptée aux sciences marines que la classification générale du MESRI, a été adoptée et complétée pour couvrir l'ensemble des activités des entités. Les entités avaient la possibilité de choisir plusieurs thèmes.

La fréquence de citation ainsi obtenue donne une première indication de l'importance relative de chaque thématique.

La Figure 7 restitue une analyse à la fois par thématique et par région. Les citations ont été regroupées en 9 thèmes, en gardant visible l'ensemble des libellés (en

⁷ Elle est fournie par le BODC : British Oceanographic Data Centre.

ordonnée). Seules les 9 principales régions en termes d'effectif sont ici considérées.

Le thème recueillant le plus de citations agglomère la surveillance et l'observation côtière et une grande partie des recherches en écologie marine. Le thème « activités humaines » recouvre les recherches directement dédiées aux acteurs socio-économiques.

Les régions consacrent, en proportion, une part similaire de leurs efforts aux quatre thématiques dominantes ; la différenciation entre les profils régionaux se fait sur les cinq autres thématiques.

Dans l'étude initiale, la segmentation et l'analyse par thématique sont basées sur l'occurrence des citations de ces thématiques par les entités. Il s'agit d'un ordre de grandeur à prendre avec précaution. Dans la mise à jour en cours, un travail sera fait pour permettre une analyse plus pertinente des effectifs alloués à chacune des thématiques de recherche.

Un aperçu des domaines d'application de la recherche en STM

Afin de faciliter l'utilisation par les pôles de compétitivité Mer, un descripteur a été ajouté à ceux du Hcéres

pour tenter de caractériser les domaines d'application. Là encore, pour ce premier inventaire, une liberté a été laissée aux entités de choisir leurs domaines d'application. Ces citations ont été regroupées en 10 domaines principaux.

Les services à l'environnement sont le domaine applicatif le plus cité. La recherche marine dite de base, c'est-à-dire non finalisée, représente un quart des citations.

La prise en compte de toutes les activités de recherche STM, notamment celles des écoles d'ingénieurs, permet de constater que les secteurs des industries de la mer et du transport maritime ont un nombre significatif de citations (la spécialisation par région est disponible dans Sextant et dans le rapport d'étude).

Répartition des 7 principaux organismes présents dans plusieurs régions selon le cumul du nombre d'ETP STM dans les entités sous leur tutelle ou cotutelle

Ces résultats sont toutefois à moduler puisqu'il s'agit des effectifs totaux des unités sous tutelle ou cotutelle, indépendamment de l'appartenance des chercheurs.

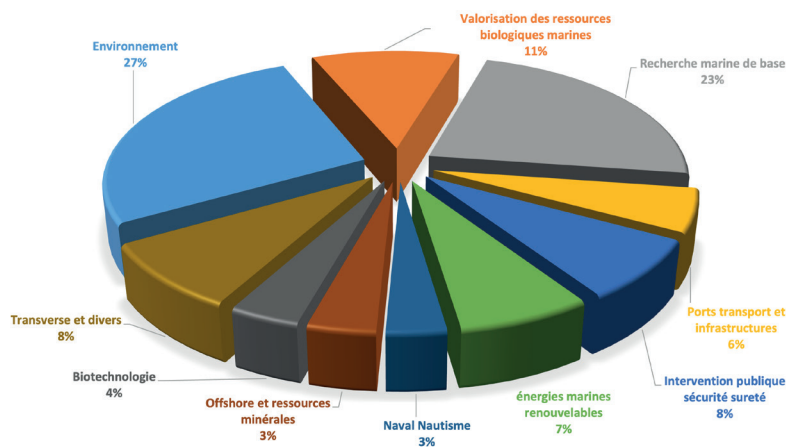


Figure 8 : Répartition des domaines applicatifs simplifiés, selon l'occurrence de citation.

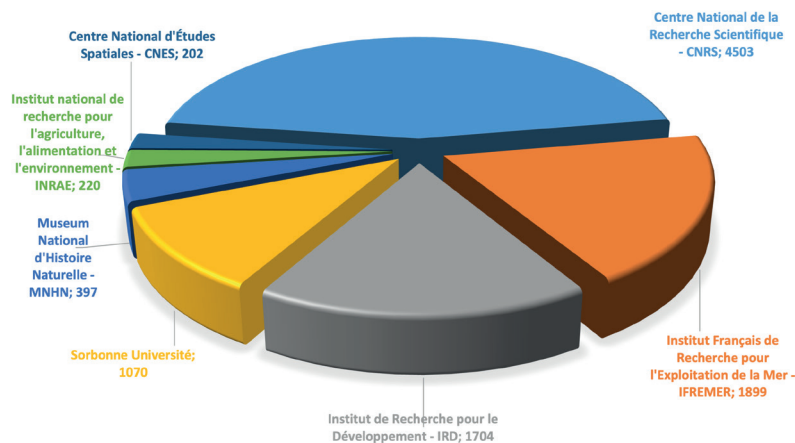


Figure 9 : Répartition des 7 principaux organismes présents dans plusieurs régions selon le cumul du nombre d'ETP STM dans les entités sous leur tutelle ou cotutelle.

Une entité présente en moyenne 2,4 tutelles, avec une forte dispersion autour de cette moyenne.

Par exemple, le CNRS, présent dans 122 entités dont les effectifs cumulés totalisent 4 502 ETP, est tutelle unique d'une seule entité. L'Ifremer est présent dans 30 entités totalisant 1 899 ETP, dont 21 entités pour lesquelles il est l'unique tutelle.

Les utilisations et perspectives de cette étude

Les chiffres et cartes publiés en 2021 sont, comme prévu, utilisés régulièrement par les services des ministères, ainsi que par les instituts et organismes, les universités et les régions. Ainsi, l'Ifremer s'en est servi pour affiner son positionnement stratégique. Les services des régions y trouvent les données qu'ils n'avaient pas nécessairement auparavant. La récente étude du CESER de Bretagne « Sciences de la mer : défi mondial, atout majeur pour la Bretagne » s'appuie largement sur cette cartographie.

Cet outil permet d'objectiver les dynamiques locales dites « de site » et les dynamiques de regroupement : par exemple, la création en 2021 de l'Institut de l'Océan de l'Alliance Sorbonne Université revendiquant 1 500 chercheurs, de l'Institut des Sciences de l'Océan à Aix-Marseille Université, créé la même année, emboîtant le pas de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), précurseur à Brest en 1997. Plus récemment, en 2025, le Centre interdisciplinaire mers et océans (CIMO) associant l'Ifremer, l'Institut Polytechnique (dont l'ENSTA qui en est membre), en partenariat avec le CNRS, a été créé pour animer le travail de 22 laboratoires.

Un des objectifs principaux de l'étude initiale était de rendre visible et mobilisable ce potentiel de 7 000 « scientifiques publics », afin que les STM attirent les meilleurs talents et compétences, et suscitent un investissement public et privé à la hauteur des enjeux maritimes de la décennie océanique qui s'ouvrirait alors. Cette demande socioéconomique, en progression, peut être illustrée par la dynamique des Pôles Mer et les manifestations nationales (comme les Assises de l'Économie de la Mer), ou internationales à fort contenu diplomatique pilotées par la France, comme la 3^e édition de l'UNOC (United Nation Ocean Conference) à Nice en 2025, faisant suite au One Ocean Summit à Brest en février 2022. Cet événement a été précédé d'un One Ocean Science Congress inédit. La présente revue consacrée à l'Océan est une autre marque de l'intérêt porté à ses enjeux et aux activités qui en dépendent.

Disposer de la carte des acteurs facilite la constitution de *consortia* pour répondre aux appels à projets ou appels d'offres. Un nombre significatif de programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR ou PPR) lancés depuis 2021 a pu l'utiliser :

- Le PPR Océan et Climat, initié en 2019 avec un budget de 40 M€ sur 7 ans, cible les zones géographiques telles que l'Arctique, les territoires ultrama-

rins français ou encore les grands fonds marins. Les appels à projets ont été lancés en 2022 et en 2024.

- Dans le cadre de l'objectif 10 « Grands fonds marins » de France 2030, une enveloppe de 273 M€ a permis de sélectionner 11 projets innovants, de lancer un PEPR et d'initier 9 campagnes d'exploration (sur 12 prévues).
- Le PEPR ATLASaSea est un programme lancé en 2025 pour une durée de 8 ans avec un budget de 41 M€. Son objectif est de construire un atlas génomique de la biodiversité marine française.
- Enfin, le PEPR BRIDGES a été lancé en septembre 2024 pour une durée de 10 ans et un budget de 28 M€. Il se concentre sur la pêche et la biodiversité dans l'Océan indien, dont il vise à renforcer la résilience sociale et environnementale.

Cependant, ils restent modestes au regard de l'effort annuel de financement (que nous avons évalué à 650 M€⁸).

Pour conclure

Dans un contexte global de maritimisation des enjeux géopolitiques mondiaux, la France, qui a autorité sur le deuxième domaine maritime du monde, a des intérêts à défendre. Ils reposent en grande partie sur une meilleure connaissance scientifique de ce milieu complexe et difficile d'accès et sur notre capacité à rester en pointe parmi les nations qui comptent dans les STM. Ainsi, une cartographie des moyens de recherche publics, régulièrement mise à jour et améliorée, fait partie des outils indispensables pour piloter l'effort national et mesurer l'atteinte des objectifs assignés.

⁸ Dans la publication de référence, plusieurs méthodes macroscopiques ont été proposées. La plus englobante ressort à 650 M€ et n'inclut pas les très grandes infrastructures de recherche (TGIR).

Cartographie des acteurs de l'économie bleue

Par Nathalie MERCIER-PERRIN

Présidente du Cluster Maritime Français (CMF)

Deuxième espace maritime mondial, la France dispose d'un potentiel océanique exceptionnel, à la croisée des enjeux énergétiques, industriels, environnementaux et géopolitiques. Cet espace, longtemps perçu comme périphérique, s'impose désormais comme un centre stratégique : l'or bleu, porté par Nathalie Mercier-Perrin, désigne une richesse globale, à la fois économique, écologique et souveraine. Cette réalité repose en grande partie sur les territoires ultramarins, qui confèrent à la France une présence maritime mondiale unique. L'économie maritime s'organise autour d'acteurs multiples – industriels, scientifiques, institutionnels et territoriaux – qui convergent sur un constat : l'océan est un levier de puissance autant qu'un espace sous tension. Pression climatique, érosion de la biodiversité, compétition internationale et mutation des usages imposent une lecture systémique. Cet article dresse une cartographie des acteurs de l'économie bleue en France et des enjeux océaniques qu'ils identifient, dans une perspective de gouvernance intégrée.

Contexte

De l'économie maritime à l'or bleu : un cadre structurant

Le secteur maritime occupe une place stratégique dans l'économie, la souveraineté et la transition écologique. Il assure l'essentiel des échanges mondiaux, soutient des filières industrielles majeures – transport, ports, construction navale, pêche, énergies marines renouvelables, services, innovation – et contribue à l'aménagement des territoires littoraux ainsi qu'au rayonnement international de la France. Dans ce contexte, le Cluster Maritime Français (CMF) joue un rôle fédérateur essentiel en rassemblant l'ensemble des acteurs de l'écosystème maritime : entreprises, fédérations professionnelles, centres de recherche, collectivités et institutions. Véritable lieu de dialogue, de coordination et de proposition, il œuvre à renforcer la compéti-

tivité, l'innovation et l'attractivité de la filière maritime française, tout en portant une vision ambitieuse d'un développement durable de l'économie de la mer. Par son action, il contribue à faire émerger des synergies entre les différents acteurs impliqués, à accompagner les transformations du secteur et à promouvoir la place de la France comme une grande nation maritime.

Sa vocation est d'autant plus primordiale puisque la France est une puissance maritime par ses territoires. Avec 10,2 millions de km² de zone économique exclusive¹, dont une large part située en outre-mer (~ 97 %), elle dispose du deuxième espace maritime mondial et du premier domaine sous-marin au monde. Ainsi, la France ne saurait être réduite aux contours de son hexagone continental : elle est, avant tout, un archipel mondial, aux confins de plusieurs océans, riche de ses treize territoires ultramarins qui dessinent une présence maritime planétaire. Cette dimension ultramarine constitue un facteur déterminant de différenciation stratégique : biodiversité exceptionnelle, exposition accrue aux effets du changement climatique, mais aussi potentiel économique et scientifique majeur.

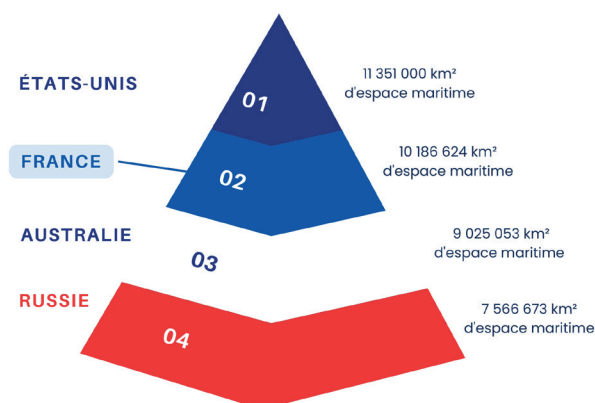


Figure 1 : Classement des espaces maritimes
(Source : Site internet de l'IHEDN, « ZEE française : comment sécuriser l'immensité », 6 octobre 2025).

Une économie de taille au cœur de la puissance maritime française

L'économie maritime française représente environ 43,3 milliards d'euros de valeur ajoutée², soit 1,5 %

¹ 10 186 624 km². Depuis 2023 une extension de la notion de plateau continental porte cette surface à 10 911 921 km² mais la surface accrue ne concerne que le sol et sous-sol marin, non la colonne d'eau et les eaux de surface : la ZEE elle-même est inchangée.

² En 2019 : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-mer-littoral/9-economie-maritime>. La valeur ajoutée concernant la marine nationale dans ces statistiques correspond au temps de paix. Elle peut être considérable en période de tension.



Figure 2 : L'Archipel France (Source : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires - Data Lab, Chiffres clés de la mer et du littoral - édition 2024).

du PIB national. Elle mobilise 525 000 emplois directs, dont 336 700 liés au tourisme littoral. En intégrant les emplois indirects et induits, elle concerne au total près de 3 millions de personnes en France, révélant son rôle structurant dans l'économie nationale et les territoires. C'est dans ce contexte que Nathalie Mercier-Perrin, présidente du Cluster Maritime Français, porte l'or bleu comme cadre d'analyse et de projection. Loin d'une approche sectorielle, l'or bleu désigne une richesse systémique fondée sur l'interdépendance entre activités humaines et équilibres océaniques, dans laquelle les outre-mer occupent une place structurante. L'or bleu ne se réduit pas à une ressource : il constitue un capital vivant, économique, écologique, géopolitique et scientifique.

Une économie bleue structurée mais fragmentée

L'économie maritime française s'appuie sur un écosystème particulièrement riche, combinant acteurs industriels de premier plan, capacités scientifiques reconnues mondialement, infrastructures stratégiques et ancrages territoriaux diversifiés. Ainsi, la France dispose d'atouts considérables pour développer une économie bleue compétitive, innovante et durable. Toutefois, malgré cette densité d'acteurs et de compétences, l'écosystème demeure encore marqué par une coordination insuffisante entre filières, territoires et niveaux de gouvernance, limitant parfois les effets de synergie et la lisibilité stratégique de l'ensemble.

Les industries maritimes structurantes occupent une place centrale dans cet édifice économique. La construction navale, la Défense, le transport et les services associés s'appuient sur des groupes majeurs tels que Naval Group, Chantiers de l'Atlantique ou CMA CGM, qui contribuent au rayonnement industriel français à l'échelle internationale. Ces acteurs jouent un rôle déterminant dans la souveraineté industrielle, l'innovation technologique, l'emploi qualifié et l'adaptation du secteur aux enjeux de transition énergétique et numérique.

Les énergéticiens participent également à la transformation de l'économie bleue au travers du développement des énergies marines renouvelables. L'éolien en mer, les technologies hydroliennes ou encore les solutions énergétiques décarbonées constituent des axes majeurs de croissance et de diversification économique. Des entreprises telles que EDF Renouvelables et TotalEnergies contribuent à structurer cette dynamique, en mobilisant leurs capacités d'investissement, leur expertise industrielle et leur innovation technologique pour accompagner la montée en puissance des filières maritimes bas carbone.

La recherche scientifique représente un autre pilier fondamental de l'économie bleue française. La compréhension des dynamiques océaniques, de la biodiversité marine, des impacts climatiques ou des usages durables de la mer repose largement sur les travaux menés par des institutions de référence comme l'Ifremer et le CNRS. Par leur production de connaissances, leurs programmes d'observation et leurs collaborations avec les acteurs publics et privés, ces organismes jouent un rôle clé dans l'aide à la décision, l'innovation et l'anticipation des transformations maritimes.

Enfin, les territoires littoraux et ultramarins constituent des espaces d'articulation essentiels de l'économie bleue. Ports, façades maritimes, métropoles côtières et collectivités ultramarines concentrent des enjeux économiques, environnementaux et géopolitiques majeurs. Ils sont à la fois des lieux d'implantation industrielle, des laboratoires d'innovation, des interfaces logistiques et des espaces de conciliation entre usages maritimes multiples. Leur capacité à fédérer les acteurs économiques, les institutions, le monde de la recherche et la société civile sera déterminante pour renforcer la cohérence, la résilience, et la compétitivité de l'économie maritime française.

Des enjeux océaniques convergents

L'océan se trouve aujourd'hui au croisement de défis majeurs, intimement liés les uns aux autres. Le changement climatique modifie les équilibres marins à travers le réchauffement des eaux, l'acidification des océans, l'élévation du niveau de la mer et la multiplication des événements extrêmes, avec des conséquences directes sur les activités économiques et les territoires littoraux. Parallèlement, l'érosion de la biodiversité marine fragilise les services écosystémiques indispensables au fonctionnement des sociétés humaines, qu'il s'agisse de la régulation climatique, des ressources halieutiques ou de la protection naturelle des côtes. Dans ce contexte, les questions de souveraineté maritime prennent une importance croissante : maîtrise des espaces maritimes, sécurité des approvisionnements, contrôle des infrastructures critiques et accès aux ressources deviennent des enjeux stratégiques pour les États. À ces dynamiques s'ajoutent des conflits d'usage de plus en plus marqués entre transport maritime, pêche, tourisme, énergies marines renouvelables, préservation environnementale ou exploitation des ressources, rendant nécessaire une gestion intégrée et concertée de l'espace maritime.

Conditions de structuration de l'or bleu

L'émergence d'une économie durable de « l'or bleu » repose sur plusieurs conditions structurantes. La gouvernance constitue un premier levier essentiel : face à la multiplicité des acteurs et à l'imbrication des échelles locale, nationale et internationale, la coordination des politiques publiques et des intérêts économiques devient déterminante. L'investissement représente un second pilier majeur, tant les besoins de financement sont importants pour accompagner la décarbonation du transport maritime, le développement des infrastructures portuaires, les biotechnologies marines ou les énergies marines renouvelables. L'innovation, technologique comme organisationnelle, apparaît également comme un moteur indispensable pour répondre aux impératifs de performance, de compétitivité et de durabilité. Enfin, l'acceptabilité sociale s'impose comme une condition incontournable : les transformations du secteur maritime nécessitent l'adhésion des territoires, des communautés littorales, des professionnels et des citoyens, afin d'assurer un développement équilibré conciliant ambitions économiques, exigences environnementales et usages sociaux.

Vers une grammaire renouvelée de l'océan

L'essor de « l'or bleu » traduit une évolution profonde de notre rapport à l'océan. Longtemps perçu principalement comme un support d'activités économiques, un espace de circulation ou un réservoir de ressources, l'océan apparaît désormais comme un système vivant, interdépendant et structurant des grands équilibres planétaires. Il joue un rôle central dans la régulation du climat, la production d'oxygène, la captation du carbone, la sécurité alimentaire et les dynamiques géopolitiques contemporaines. Cette évolution impose une véritable transformation des cadres de pensée, des modèles de gouvernance et des stratégies économiques. Elle invite à dépasser une logique sectorielle ou extractive pour adopter une approche systémique, fondée sur l'interdépendance des usages, la résilience des écosystèmes et la soutenabilité de long terme. Une nouvelle « grammaire de l'océan » se dessine ainsi, dans laquelle performance économique, préservation du vivant et souveraineté maritime ne peuvent plus être envisagées séparément.

La souveraineté maritime française nécessite la construction d'une vision stratégique géopolitique et économique commune sur un temps long, où la protection des intérêts nationaux s'harmonise avec la promotion de l'innovation et de la compétitivité, et où la protection des espaces maritimes et leur exploitation doivent être en parfaite harmonie : tels sont les objectifs à poursuivre pour construire une économie raisonnée et raisonnable, une colonne vertébrale essentielle pour donner du sens à notre jeunesse et plus largement aux Français.

Ces enjeux exigent une mobilisation collective qui tienne compte des atouts et spécificités de chaque territoire et de chaque filière. L'équilibre à tenir entre les missions régaliennes de l'État et le dynamisme de l'économie maritime repose sur une collaboration étroite entre les acteurs publics et privés. Cette alchimie subtile est

notamment au cœur de l'action des *clusters* maritimes ou du projet de rapprochement entre les marines marchande et militaire, permettant aujourd'hui de dessiner les contours d'un avenir maritime durable et prospère. La France doit également s'appuyer sur le rôle stratégique des territoires ultramarins, qui forment cet archipel face aux réalités d'un ordre mondial redessiné.

Innovation et protection de la ressource en eau

L'innovation s'impose aujourd'hui comme un levier déterminant pour répondre aux défis croissants liés à la protection de la ressource en eau. Face aux effets du changement climatique, à l'intensification des usages et aux pressions exercées sur les écosystèmes aquatiques, de nouvelles solutions émergent pour améliorer la gestion, la préservation et la valorisation durable de l'eau. Technologies de traitement, outils de surveillance, sobriété hydrique, réemploi des eaux, gouvernance territoriale ou encore solutions fondées sur la nature participent à la transformation des modèles traditionnels de gestion de la ressource. Dans cette dynamique, le prix Next Innov – Agir pour l'Eau, porté par Banque Populaire, met en lumière des initiatives innovantes et des projets à fort impact en faveur d'une gestion plus durable de l'eau. Ce prix illustre la mobilisation croissante des acteurs économiques et financiers autour des enjeux hydriques, devenus centraux pour les territoires, les filières industrielles et les transitions environnementales. Je participe à cette démarche en tant que membre du jury, contribuant à l'identification et à la valorisation de solutions porteuses d'innovation et d'utilité collective. La cérémonie de remise du prix, prévue le 11 juin 2026, constituera un temps fort de reconnaissance pour les acteurs engagés dans la préservation de cette ressource stratégique, au cœur des équilibres écologiques, économiques et sociétaux.

La protection de l'eau ne peut plus être envisagée comme une simple ambition sectorielle : elle constitue une responsabilité collective, urgente et structurante pour l'avenir. Préserver cette ressource vitale suppose de dépasser les logiques fragmentées pour construire des trajectoires cohérentes, fondées sur la sobriété, l'innovation et la coopération entre acteurs publics, privés et scientifiques. Chaque territoire, chaque filière et chaque organisation a désormais un rôle à jouer dans la transformation des usages et dans la réduction des pressions exercées sur les milieux aquatiques. Dans ce contexte, l'engagement ne peut rester déclaratif : il doit se traduire par des actions concrètes, mesurables et pérennes, capables d'accélérer la transition vers une gestion durable de l'eau. Mobiliser les énergies, soutenir les solutions émergentes et amplifier les initiatives à impact positif devient essentiel pour répondre à l'ampleur des défis actuels et futurs.

Cartographie française des organisations non gouvernementales de protection de l'environnement marin et littoral

Par Gauthier CARLE

Directeur Général de la Plateforme Océan & Climat

La société civile française mobilisée pour la protection de l'environnement marin et littoral forme un espace hétérogène d'ONG : associations généralistes et spécialisées, fondations scientifiques, gestionnaires d'espaces naturels, associations locales, plateformes et coalitions.

Cet article propose une cartographie de ces acteurs en montrant comment ils contribuent à faire de l'océan une cause publique transversale. À partir des grands facteurs de pression identifiés par l'IPBES, il analyse les fronts de mobilisation de cette société civile et ses principaux répertoires d'action, conditions d'influence et ressources.

Introduction

Au cœur des grandes crises écologiques contemporaines, l'océan est devenu un objet transversal d'action publique en France. Cette prise en compte est notamment le résultat d'un travail de construction sociale de la part de la société civile, à travers une mise en récit et l'inscription de l'océan à l'agenda politique.

La société civile environnementale englobe un espace d'organisations, de réseaux et de mobilisations situé entre l'État et la sphère privée. Les organisations non gouvernementales (ONG) incarnent cette société civile et sont définies comme des organisations privées, autonomes, à but non lucratif et orientées vers des objectifs d'intérêt collectif (Vakil, 1997). Elles assurent une grande diversité de fonctions : l'alerte, la production d'expertise, le plaidoyer, la mobilisation, la gestion. Dans le domaine de l'océan, elles recourent à une pluralité d'acteurs : des fondations scientifiques, aux associations locales en passant par des coalitions.

La société civile océan française est un espace multi-organisationnel composé d'un ensemble d'acteurs reliés par des circulations de savoirs, des campagnes, des controverses, des coalitions et des répertoires d'actions. L'article propose donc une typologie des acteurs de la société civile océan, puis analyse les différents fronts de mobilisation à partir des facteurs de pression identifiés par l'IPBES, avant d'examiner les répertoires d'actions et les conditions d'influence de cette société civile.

Les types d'acteurs : une société civile protéiforme

ONG généralistes et spécialisées

Les ONG généralistes contribuent à relier l'océan aux grandes causes écologiques contemporaines : changement climatique, érosion de la biodiversité, justice sociale et environnementale, transition économique. WWF France ou Humanité et Biodiversité permettent ainsi de faire le lien entre l'océan et des pressions externes comme les gaz à effet de serre, les pollutions terrestres ou les politiques commerciales. Si les ONG généralistes inscrivent l'océan dans une cause écologique plus large, ce dernier demeure souvent une part infime de leur travail.

Les ONG spécialisées incarnent la cause océan. BLOOM en est l'un des exemples les plus connus, travaillant sur les pratiques de pêche, les subventions néfastes à l'environnement marin ou les aires marines protégées. Surfrider Foundation Europe rend visibles les pollutions aquatiques, les déchets plastiques ou les usages des littoraux. Dans un registre activiste et plus frontal, Sea Shepherd France mobilise sur la défense de la faune marine. Enfin, Des Requins et des Hommes se spécialise dans l'étude et la protection des éla-smobranches.

Cartographie des ressources et atouts français

Producteurs d'expertise, de données et de médiation

La professionnalisation des ONG environnementales et le développement de la figure de « l'expert militant » produisant données, expertises et recommandations (Ollitrault, 2008) témoignent de leur participation accrue à la production et à la circulation des savoirs. C'est particulièrement le cas dans le domaine marin, où les connaissances manquent encore largement et où les phénomènes à l'œuvre sont invisibles pour le grand public et les décideurs : réchauffement de l'océan, acidification de l'eau, pollution aux microplastiques, captures accidentelles.

La Fondation Tara Océan illustre cette position hybride, assurant la visibilité de la dégradation de la santé de l'océan. Avec sa goélette et sa station polaire, elle articule expéditions scientifiques, production de connaissances, médiation et plaidoyer. Expédition MED peut également être citée sur les microplastiques, ou Under The Pole sur la zone mésophotique et les pôles. Ces organisations démontrent la porosité des frontières entre science, expertise citoyenne et décisions publiques dans les controverses environnementales (Callon, Lascoumes et Barthe, 2001).

Gestionnaires, associations locales et plateformes

Les ONG de protection de l'océan participent également à la gestion concrète des milieux naturels. Ainsi, la LPO gère et cogère une trentaine de réserves naturelles nationales et régionales. Cette fonction illustre la complexité des relations entre acteurs associatifs et États ; les associations pouvant être simultanément contestataires, partenaires institutionnelles et opératrices de politiques de conservation (Ostrom, 1990).

Les associations locales jouent également un rôle déterminant. Eaux et Rivières de Bretagne se spécialise ainsi sur la qualité de l'eau et les pollutions en Bretagne, tandis que Défense des milieux aquatiques (DMA) œuvre en Nouvelle-Aquitaine pour faire appliquer les lois et règlements relatifs à la protection d'espèces et habitats aquatiques.

Les plateformes et les coalitions jouent enfin un rôle de mise en relation, de renforcement des capacités et d'amplification des messages. La Plateforme Océan & Climat fédère plus de 115 organisations issues de la société civile. Son rôle de créateur de synergies et de plaidoyer collectif se matérialise en France dans la coordination du Comité France Océan, une instance de concertation entre État, recherche et ONG.

Les grands fronts de mobilisation de la communauté océan

Exploitation des ressources du milieu marin : la pêche comme enjeu central

La surexploitation des ressources du milieu marin, à travers la pêche, est le principal facteur de pression sur l'océan (IPBES, 2019). Elle est donc un front central de mobilisation pour la société civile océan, qui se struc-

ture autour des enjeux suivants : bon fonctionnement des écosystèmes, méthodes de pêche, subventions, captures accidentelles, état des stocks, emploi littoral, souveraineté alimentaire et justice sociale. Il s'agit ici d'un conflit de transition portant sur la distribution des coûts et des bénéfices de la transition écologique.

BLOOM illustre la capacité d'une ONG spécialiste de la pêche à transformer des enjeux techniques et méconnus en controverses publiques et en revendications politiques. Planète Mer associe de son côté les professionnels de la pêche à l'échelle du territoire méditerranéen pour mettre en place une gestion partagée et adaptative. En outre, des associations se développent sur la consommation de produits aquatiques, à l'instar d'Ethic Océan ou de Seastemik. L'ensemble de ces acteurs démontre que des instruments d'action publique comme les quotas ou les subventions sont en réalité de véritables choix politiques (Lascoumes et Le Galès, 2004).

Changements d'usage de la mer et du littoral : protéger, restaurer et aménager

Le second front de mobilisation est celui des changements d'usage des mers et du littoral avec comme question centrale la planification des usages. Le débat sur les niveaux de protection des aires marines protégées françaises (AMP) en est emblématique, porté notamment par WWF France ou Greenpeace. Le Comité français de l'UICN apporte ici une expertise sur les standards internationaux de gestion des AMP.

Cette question de la planification des usages se traduit concrètement au niveau local où de nouveaux usages font l'objet de conflits environnementaux. C'est le cas du déploiement de l'éolien en mer et de la localisation des parcs, qui cristallise l'attention d'associations comme la LPO. Les usages sur les bassins versants, qu'ils soient agricoles ou industriels, affectant la qualité des eaux côtières, en sont d'autres exemples.

Pressions diffuses et globales : pollutions, changement climatique, espèces exotiques envahissantes

Le troisième front regroupe les pressions diffuses et globales que sont les pollutions, le changement climatique et les espèces exotiques envahissantes. Elles ont en commun d'être souvent d'origine lointaine, cumulatives et complexes à gouverner. Elles rappellent que l'océan est un système connecté et illustrent le continuum terre-mer. Qu'il s'agisse des pollutions plastiques, chimiques, agricoles ou urbaines, Expedition MED, MerTerre, Robin des Bois ou SOS Mal de Seine positionnent le débat sur la réduction à la source, la prévention et la responsabilité des producteurs. Plus marginales, les pollutions sonores sont l'apanage de l'ONG IFAW.

Le changement climatique est une pression transversale dont les effets sont multiples, avec des conséquences pour les écosystèmes et les populations côtières. La Plateforme Océan & Climat joue un rôle structurant dans la compréhension du système océan-

climat-biodiversité en liant savoirs scientifiques et plaidoyer multiscalaire. Elle a notamment permis d'accroître l'attention sur la problématique de la hausse du niveau de la mer en France comme à l'international. Des associations spécialisées comme T&E travaillent quant à elles spécifiquement sur les émissions de secteurs économiques comme celui du transport maritime.

Enfin, les espèces exotiques envahissantes sont moins centrales dans l'action des ONG françaises, mais constituent un facteur de pression diffus. Elles proviennent notamment du transport maritime, des eaux de ballast, de l'aquaculture, de recompositions écologiques ou de loisirs. Elles mobilisent davantage les gestionnaires, les scientifiques et les associations locales.

Les répertoires d'action et conditions d'influence

Campaigning et mise à l'agenda

Le *campaigning* constitue l'un des répertoires d'actions principaux des ONG françaises de protection de l'océan. Il s'agit de participer directement à la mise à l'agenda et au cadrage des problèmes environnementaux à travers la sélection d'un problème, l'identification des responsabilités, la formulation de demandes et la création d'une pression publique (Hajer, 1995). Les campagnes contre certaines pratiques de pêche, contre les pollutions plastiques ou contre l'exploitation minière des grands fonds en sont des exemples emblématiques, portés par BLOOM, Surfrider Foundation Europe ou Greenpeace France.

Le *campaigning* est indispensable dans un domaine où les altérations de la bonne santé de l'océan sont souvent invisibles pour l'œil du décideur comme du grand public. Il crée des récits, s'appuie sur des images et chiffres marquants ainsi que des mots d'ordre qui font écho dans l'espace public. Il combine mobilisation, expertise, médiatisation et interpellation institutionnelle (Tilly, 2004). Ainsi, à la veille de la Conférence des Nations unies sur l'Océan en France en 2025, les ONG françaises ont lancé une campagne d'ampleur sur les niveaux de protection des AMP françaises.

Plaidoyer institutionnel et contentieux

Les rapports entre ONG et États ne se bornent pas à des rapports de contestation, et les ONG font également appel au registre du plaidoyer institutionnel et à la co-construction des politiques publiques. Elles plaident à partir de diagnostics, de données, d'indicateurs, de rapports et d'expertises. Cette évolution explique leur présence croissante dans les consultations, les auditions, les comités, et les négociations européennes et internationales. Des ONG sont spécialisées dans ce registre et particulièrement actives dans la comitologie nationale, comme le Comité français de l'UICN ou WWF France.

Le contentieux est un prolongement de ce répertoire d'expertise. En rappelant les obligations juridiques, il conteste des autorisations ou fait reconnaître des manquements. Ce registre est manié par un nombre limité

d'associations, parmi lesquelles on retrouve la LPO, FNE ou encore EJV et DMA, qui ont récemment lancé un contentieux pour obtenir l'interdiction du chalutage de fond dans certaines AMP du réseau Natura 2000.

Mise en réseau et ressources financières

La capacité d'influence de la société civile océan peut dépendre de sa capacité à se mettre en réseau pour transformer la multiplicité des expertises et les échelles d'action en une capacité collective. En mutualisant des savoirs, en coordonnant des positions, elle permet d'accéder à des arènes de décisions et à d'autres échelles (Diani et McAdam, 2003). C'est le cas de la Plateforme Océan & Climat, dont la mise en réseau des 115 acteurs a permis de porter la voix de la communauté océan dans les négociations internationales sur le climat et la biodiversité. FNE est aussi un réseau de plus de 6 000 associations locales, tandis que le Plan Bleu est un réseau méditerranéen.

Enfin, les financements soulèvent directement la question de l'autonomie, de la redevabilité et de la dépendance des ONG. En effet, les ressources conditionnent les formes d'actions collectives (McCarthy et Zald, 1977 ; Pfeffer et Salancik, 1978). Différents types de financement de la société civile peuvent être identifiés : les dons, les cotisations et adhésions des membres des associations, les subventions publiques françaises et européennes, le mécénat d'entreprise et la philanthropie. La plupart des ONG reposent sur un mix de financements.

Conclusion

Cartographier la société civile française de l'océan met en évidence un espace d'intermédiation où se produisent savoirs, données, campagnes, coalitions et contentieux. Hétérogène, cette société civile associe ONG généralistes, associations spécialisées, fondations scientifiques, gestionnaires d'espaces naturels, associations locales, plateformes et coalitions. Elle agit sur les grands facteurs de pression identifiés par l'IPBES et mobilise plusieurs répertoires d'action : *campaigning*, plaidoyer institutionnel, expertise, contentieux, mise en réseau. La société civile océan constitue ainsi une infrastructure de la transition écologique, capable de faire de l'océan une cause publique transversale en influençant la puissance publique, laquelle est également capable de lui déléguer des formes de gestion.

Bibliographie

- CALLON M., LASCOUMES P. & BARTHE Y. (2001), *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Seuil.
- DIANI M. & MCADAM D. dir. (2003), *Social movements and networks: Relational approaches to collective action*, Oxford, Oxford University Press.
- HAJER M. (1995), *The politics of environmental discourse: Ecological modernization and the policy process*, Oxford, Oxford University Press.

- IPBES (2019), "Global assessment report on biodiversity and ecosystem services", Bonn, IPBES Secretariat.
- LASCOUMES P. & LE GALÈS P. dir. (2004), *Gouverner par les instruments*, Paris, Presses de Sciences Po.
- MCCARTHY J. D. & ZALDM. N. (1977), "Resource mobilization and social movements: A partial theory", *American Journal of Sociology*, vol. 82, n°6, pp. 1212-1241.
- OLLITRAULT S. (2008), *Militer pour la planète. Sociologie des écologistes*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- OSTROM E. (1990), *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*, Cambridge, Cambridge University Press.
- PFEFFER J. & SALANCIK G. R. (1978), *The external control of organizations: A resource dependence perspective*, New York, Harper & Row.
- TILLY C. (2004), *Social movements, 1768-2004*, Boulder, Paradigm Publishers.
- VAKIL A. C. (1997), "Confronting the classification problem: Toward a taxonomy of NGOs", *World Development*, vol. 25, n°12, pp. 2057-2070.

Prospective stratégique et limites planétaires : construire une nouvelle grammaire de futurs possibles

Par Pierre-Baptiste GOUTAGNY

Doctorant et responsable de développement senior – IF Initiative, Carbone 4

Explorer les futurs possibles pour les entreprises doit désormais s'inscrire dans la finitude physique du monde. En effet, le franchissement des limites planétaires bouleverse les activités des entreprises et rend les approches stratégiques traditionnelles largement inopérantes. Aussi, la prospective par scénarios, outil précieux pour penser l'incertitude et le long terme, doit elle-même intégrer ces dimensions pour se hisser à la hauteur des défis stratégiques contemporains.

Dans cette perspective, le dispositif de recherche-action IF Initiative porté par le cabinet Carbone 4 aux côtés d'entreprises et d'équipes de recherche partenaires vise à construire un référentiel stratégique et prospectif adapté à ces enjeux physiques et systémiques. À quels principes directeurs une telle approche prospective tente-t-elle de répondre et que produit-elle pour les organisations qui y participent et s'en saisissent ?

Comment ne pas devenir une organisation obsolète ? Telle est la question stratégique vitale pour les décideurs qui font face aux multiples transformations structurelles de leur environnement d'affaires. Six des neuf limites planétaires sont aujourd'hui franchies (Richardson *et al.*, 2023). Ce constat ne relève plus du débat : il décrit un état de fait qui reconfigure en profondeur les conditions d'activité des entreprises et pose des défis inédits pour les modèles d'affaires et l'ensemble des chaînes de valeur. Les signaux se multiplient et rendent l'analyse stratégique toujours plus complexe : les rétroactions environnementales qui impactent la capacité à produire, auxquelles s'ajoutent les perturbations géopolitiques sur les chaînes d'approvisionnement, l'incertitude sur l'évolution des technologies ou encore la transformation de la demande sous l'effet de l'évolution des usages et des attentes des consommateurs. Or, les outils dont disposent les décideurs pour se projeter ont été conçus pour un monde qui n'existe plus : ils ne permettent donc plus aux entreprises de saisir avec acuité les transformations en cours.

Les limites des modèles et scénarios prospectifs existants pour la stratégie d'entreprise

Les directions d'entreprise qui souhaitent alimenter leur réflexion stratégique par l'analyse prospective disposent d'un répertoire foisonnant de scénarios. Qu'ils proviennent de l'Agence internationale de l'Énergie

(Net Zero Emissions¹, Stated Policies², Announced Pledges³), du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (Shared Socioeconomic Pathways⁴), des régulateurs financiers comme le Network for Greening the Financial System⁵ (NGFS) pour les enjeux énergie-climat ou de la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques⁶ sur la biodiversité, ils se présentent chacun dans leur registre – politiques publiques, modélisation de trajectoires ou *stress tests* financiers – comme autant de référentiels mobilisables. Cependant, ils ont été conçus pour répondre à des questions qui ne sont pas spécifiquement celles des décideurs mais celles des décideurs politiques et présentent à ce titre plusieurs limites importantes.

Un manque de transparence des hypothèses

La majorité des scénarios sont fondés sur des travaux de modélisation de type IAM (Integrated Assessment

¹ <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/net-zero-emissions-by-2050-scenario-nze>

² <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/stated-policies-scenario-steps>

³ <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model/announced-pledges-scenario-aps>

⁴ https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

⁵ <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/>

⁶ https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/downloads/pdf/SPM_Deliverable_3c.pdf

Models). Leur légitimité se trouve mise en cause (Cointe, 2019) pour leur effet « boîte noire » : les équations et paramètres sous-jacents sont difficilement accessibles aux utilisateurs. Par ailleurs, les IAM s'avèrent souvent aveugles aux risques induits par la dérive climatique et les rétroactions environnementales (Grandjean, 2024). De plus, ils intègrent de manière exogène des hypothèses de croissance à partir desquelles découlent des évolutions de la demande, alors que des transformations des modes de vie peuvent modifier ces projections. Enfin, ils embarquent des hypothèses critiquables concernant le déploiement de solutions technologiques (comme celles de capture, de stockage et de valorisation du carbone). Ainsi, les modèles tendent, par leurs principes de construction, à réduire voire verrouiller l'espace des futurs possibles.

Un défaut de désagrégation et de granularité

Ces modèles n'intègrent pas une représentation suffisamment désagrégée à la fois par régions géographiques et par secteurs économiques afin que les entreprises puissent directement les utiliser dans leur processus stratégique. Autrement dit, ils ne permettent pas de descendre jusqu'aux sous-jacents physiques des activités productives dont une entreprise a besoin : mètres carrés construits, tonnages transportés, surfaces agricoles mobilisées, etc. Sans cette grille de lecture, ces scénarios offrent un cadre de réflexion utile mais difficile à articuler avec des décisions d'investissement ou de transformation.

Une faille de cohérence systémique

Ces modèles ne prennent généralement en compte que les enjeux énergie-climat et ignorent les contraintes physiques sur les ressources clés de la transition (métaux critiques, biomasse) et les autres frontières planétaires dont le dépassement engendre des rétroactions sur l'économie (pour deux contre-exemples récents voir notamment Schlesier *et al.*, 2024, et van Vuuren *et al.*, 2025). Aussi, ils font l'impasse sur la mise en cohérence écologique des différentes variables à représenter. Or, c'est précisément le caractère interconnecté de ces dépassements qui constitue le risque stratégique majeur pour les entreprises (Williams, Perego et Whiteman, 2025) : une trajectoire de décarbonation qui ne dit rien de la pression qu'elle exerce sur la disponibilité des matériaux critiques ou sur les sols n'éclaire qu'imparfaitement la décision stratégique. Au-delà, l'incertitude à laquelle les décideurs font face demeure irréductible à la modélisation quantitative : les dynamiques géopolitiques (comme les rivalités autour de ressources critiques et les effets de politiques climatiques entre régions) contribuent également à redéfinir les chaînes de valeur et contraignent les stratégies de transition. Ne pouvant être mis en équation, ces enjeux doivent néanmoins être intégrés dans tout effort prospectif sérieux.

Par conséquent, lorsqu'on les mobilise hors des cas d'usage et des utilisateurs cibles pour lesquels ils ont été construits, les modèles climatiques et macroéconomiques se révèlent inadéquats pour traiter les enjeux des entreprises. Prises ensemble, ces faiblesses

dessinent l'espace d'un référentiel prospectif spécifiquement conçu pour la stratégie d'entreprise dans un monde fini.

Imaginer et représenter des futurs compatibles avec le cadre des limites planétaires : le dispositif IF Initiative

Lancé en 2022 par Carbone 4, le dispositif IF Initiative⁷ vise à construire des scénarios d'évolution de l'environnement d'affaires des entreprises à un horizon de 30 à 40 ans. Il réunit une vingtaine d'entreprises issues de secteurs variés, plusieurs équipes de recherche en sciences du système Terre (ISTerre UGA-CNRS, CIRAD), en macroéconomie (AFD), en sciences de gestion (emlyon business school) et en design (Strate école de design). Son objectif est d'aider les entreprises à comprendre et à organiser les transformations de leurs activités face au dépassement des limites planétaires ainsi qu'à structurer le dialogue stratégique avec leurs parties prenantes.

Principes de la modélisation⁸

Le modèle est un outil de comptabilité biophysique des impacts des activités humaines et permet la construction de scénarios prospectifs à destination des acteurs économiques. Le modèle met en œuvre l'approche DMFA (Dynamic Material Flow Analysis) (Brunner et Rechberger, 2017) pour représenter et projeter de manière métabolique le système économique par flux, stocks et processus. Il décrit les flux d'énergie et de matière en unités physiques (m^2 , t, kWh, etc.) et permet la traçabilité du stock d'objets (bâtiments, voitures, etc.) en tenant compte des contraintes physiques (disponibilité et accès aux ressources, pollutions, changement climatique) et des rétroactions environnementales. Les variables d'entrées et de sorties du modèle sont des indicateurs reliés par des équations physiques où aucun *proxy* monétaire n'est utilisé ni aucune optimisation macroéconomique n'est menée. Aussi, ce qui est modélisé repose uniquement sur des lois physiques comme la conservation de la masse et de l'énergie. Pour garantir la transparence, un principe de modélisation commun à tous les secteurs a été adopté à l'échelle de chaque « objet technique » représenté, par la décomposition explicite des étapes des chaînes de valeurs et une attribution des consommations d'énergie et de matières à la maille des activités. Une vision systémique permet de représenter l'ensemble de l'économie et révèle les liens d'interdépendances entre les différents secteurs.

À partir d'hypothèses sur l'évolution des modes de vie, le modèle fonctionne comme un outil de quantification : consommations d'énergie et de matières, besoins en surfaces arables (le niveau de déforestation permet ici d'approximer une des pressions sur la biodiversité),

⁷ <https://www.ifinitiative.com>

⁸ Pour plus de détails : <https://www.ifinitiative.com/imaginer#modelisation>

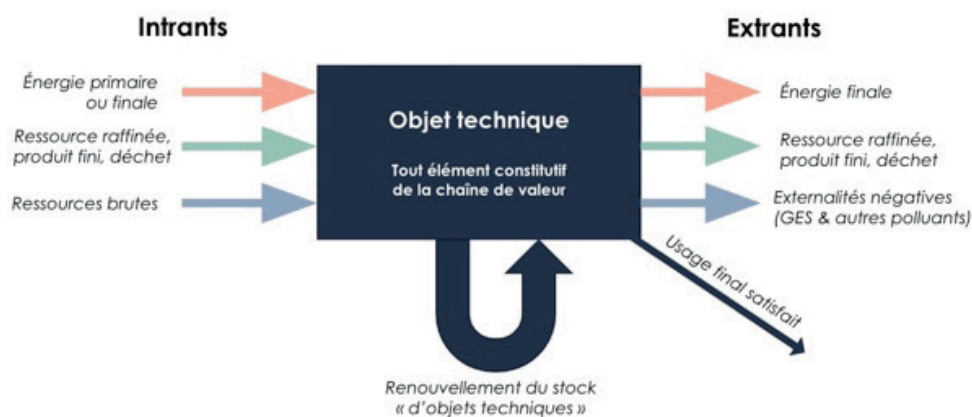


Figure 1 : Schéma du motif générique de la modélisation (Source : IF Initiative par Carbone 4).

extraction de ressources minérales, émissions de gaz à effet de serre et pollutions. Le modèle assure la cohérence entre les évolutions des usages, celles des techniques (infrastructures, efficacité énergétique, changement du mix énergétique, nouvelles techniques de production, etc.), celles sur la demande totale en ressources ainsi que les rétroactions issues des émissions de gaz à effet de serre par la destruction d'actifs.

Principes de la scénarisation⁹

À partir du modèle, les scénarios sont construits pour permettre aux dirigeants d'entreprises d'explorer les transformations des activités économiques dans un monde fini. Ils sont le résultat de combinaisons entre des chiffres (des indicateurs physiques quantifiés) et des lettres (des narratifs). Ils combinent des évolutions régionalisées des modes de vie – pour anticiper les dynamiques de transformation de la demande –, des niveaux de pression sur les limites planétaires, des évolutions du système productif – pour anticiper l'impact des technologies (en termes d'intensité matérielle et énergétique par activités ou produits) sur les usages et sur l'empreinte physique des activités humaines – et des configurations géopolitiques – pour prendre en compte les possibles contraintes d'accès aux ressources et les évolutions régionales différenciées des activités.

Le processus de scénarisation est séquentiel et itératif :

- à partir d'un scénario tendanciel qui prolonge la croissance des usages et les changements techniques en cours, projection d'évolutions différenciées des modes de vie et des usages (se nourrir, se loger, se soigner, se vêtir, se déplacer, s'informer/se former/se divertir, déplacer/acheminer) en fonction de systèmes de valeurs influents qui transforment les préférences individuelles et collectives ; choix de limites et d'un niveau de progrès technologique ;
- calcul de l'empreinte matérielle, énergétique et en termes d'émissions des scénarios et comparaison des résultats aux objectifs de soutenabilité du scénario ;

- résolution des dépassements par la transformation des modes productifs et des productions par l'activation de leviers techniques (en amont et en aval dans la chaîne de valeur) puis par la modulation des usages (proportionnellement aux préférences de chaque scénario) pour en respecter les limites. Par le rebouclage des ressources et des impacts, les scénarios éclairent les conditions de possibilité des activités économiques, en résolvant quantitativement les dépassements et les compétitions d'usage intersectorielles et en explicitant qualitativement les contreparties en termes de dégradations environnementales. Au lieu d'empiler des évolutions incompatibles des contraintes biophysiques, ils permettent de délimiter le terrain de jeu possible en excluant les paris perdus d'avance.

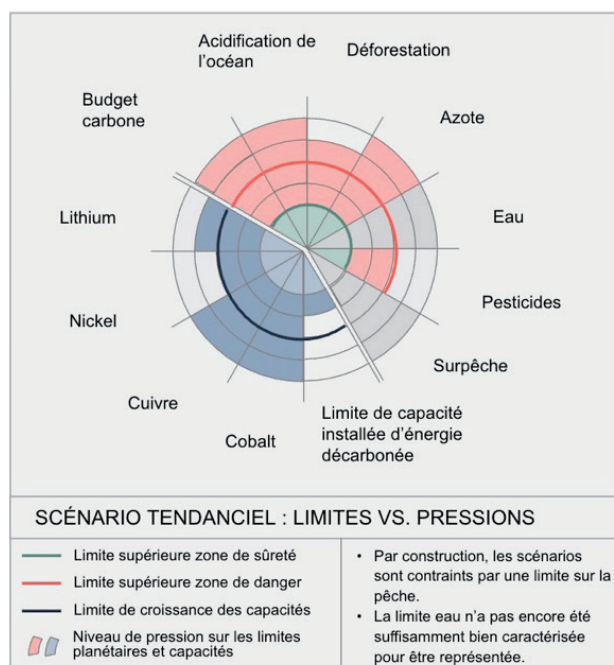


Figure 2 : Représentation du scénario tendanciel en termes de niveau de pression sur les limites planétaires et de capacités (Source : IF Initiative par Carbone 4).

⁹ Pour plus de détails : <https://www.ifinitiative.com/imaginer#modelisation>

Tableau comparatif des principes de construction des scénarios IF Initiative avec les principaux scénarios énergie-climat existants (Source : IF Initiative par Carbone 4) :

	Scénarios IF Initiative	Scénarios énergie-climat issus des modélisations macroéconomiques
Principes de calcul de l'empreinte physique	Rebouclage physique par le calcul de l'empreinte énergétique et matérielle des activités économiques	Analyses d'empreinte matérielle réalisées <i>ex post</i> à partir de <i>proxies</i> économiques.
Compétitions d'usage, dépassements et principes de résolution	Caractérisation de la contribution des différents secteurs et régions au dépassement des limites Plusieurs approches de résolution possibles (selon la difficulté et la priorité d'activation de leviers techniques ou sur les usages)	La résolution des contraintes s'effectue par les prix et l'optimisation des coûts.
Facteurs de changement et de différenciation des scénarios	Prise en compte d'hypothèses sur les changements de modes de vie et de préférences entre les usages et d'hypothèses d'évolution des modes productifs et des mix technologiques	Définition d'hypothèses exogènes de croissance du PIB et traduction des SSP en indicateurs économiques
Rétroactions environnementales	Intégration d'une fonction de dommages des rétroactions climatiques sur la production Matérialisation régionale par la destruction d'actifs et par des impacts sur les usages des terres	Intégration d'une fonction de dommages sur le capital et/ou le PIB
Limites planétaires	Prise en compte du cadre des limites planétaires (telles que définies par le Stockholm Resilience Centre) Autres limites physiques : surpêche, plastique, quantité de minéraux critiques extraits, capacité maximale installée de production d'énergie bas-carbone, CO ₂ de ressource	Scénarios principalement axés sur les enjeux énergétiques et climatiques
Désagrégation des données par rapport aux activités économiques	Données sur les flux physiques sous-jacents aux activités (volumes et techniques de production, matériaux et impacts environnementaux)	Données se réduisant aux flux d'énergie par vecteur et par source

Outils des processus stratégiques internes et entre acteurs : vision du monde et coalitions

Les dirigeants attendent souvent des scénarios prospectifs qu'ils leur permettent de prédire le futur alors que leur vertu consiste précisément à mettre à l'épreuve et à renouveler leur vision du monde. C'est une intuition ancienne : Pierre Wack, dont les travaux chez Royal Dutch Shell ont fondé la pratique du *scenario planning*, soutenait déjà que le rôle des scénarios n'est pas de prévoir le futur mais de transformer les modèles mentaux des dirigeants (Wack, 1985a, 1985b). Aussi, en mettant en scène la matérialité du cadre biophysique dans lequel s'inscrivent les activités des entreprises et les impacts auxquels elles sont exposées, la boîte à outils développée par IF Initiative vise à faciliter le pilotage stratégique face aux risques ainsi que la prise de décision et l'orientation des modèles économiques et des choix d'investissements. De ce point de vue, les scénarios permettent aux dirigeants de mettre à jour leur lecture du monde, en envisageant aussi bien les futurs impossibles d'un point de vue physique auxquels renoncer que les opportunités qui pourraient émerger de la reconfiguration des chaînes de valeur.

Au-delà, le dispositif permet à des organisations dont les intérêts sont souvent divergents, à partir de

représentations partagées, de se projeter dans des futurs compatibles avec les contraintes physiques du monde fini. Pensés comme le socle d'une grammaire de futurs dont chaque organisation maîtrise les règles syntaxiques, ces scénarios permettent autant d'alimenter le débat stratégique interne à chaque organisation que de faciliter la coordination interorganisationnelle et intersectorielle. En leur permettant d'identifier les potentiels risques d'éviction de leur marché ou de ruptures au sein de leur chaîne de valeur sous l'effet de contraintes d'accès aux ressources, ils invitent à reconsidérer les rapports de compétition au sein et au-delà des secteurs afin de dépasser les dilemmes du prisonnier. Dans un monde où les dégradations et les rétroactions environnementales limitent structurellement le champ des futurs possibles, la stratégie d'entreprise ne peut plus se penser uniquement à l'échelle de la firme individuelle. Elle suppose, comme l'a souligné Alain-Charles Martinet (2022), un nouvel *homo strategicus* qui soit aussi acteur de configurations collectives et de coalitions d'acteurs reliés par une lecture commune de leurs interdépendances à leur milieu (Goutagny *et al.*, 2025). Les outils prospectifs deviennent alors moins des supports d'aide à la décision pour les dirigeants que des vecteurs de coordination pour des collectifs d'entreprises.

Bibliographie

BRUNNER P. H. & RECHBERGER H. (2017), *Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers*, Second Edition, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>

COINTE B., CASSEN C. & NADAÏ A. (2019), "Organising policy-relevant knowledge for climate action: Integrated assessment modelling, the IPCC, and the emergence of a collective expertise on socioeconomic emission scenarios", *Science & Technology Studies, Special issue : The Politics of Anticipatory Expertise*, 32(4), pp. 36-57. <https://doi.org/10.23987/sts.65031>

GOUTAGNY P.-B., CHAZAL Y., PORTALIER J. & GAUTHIER T. (2025), « Stratégie d'entreprises face à l'Anthropocène : la voie des milieux », *Millénaire*, <https://millenaire3.grandlyon.com/ressources/2025/strategie-d-entreprises-face-a-l-anthropocene-la-voie-des-milieux>

GRANDJEANA. (2024), « Les modèles IAMs et leurs limites », Chaire Énergie et Prospérité, <https://chair-energy-prosperity.org/wp-content/uploads/2024/10/WP2024-les-modeles-IAMs-et-leurs-limites.pdf>

MARTINET A. C. (2022), *Homo Strategicus: Capitalisme liquide, destruction créatrice et mondes habitables*, éditions EMS.

RICHARDSON K. *et al.* (2023), "Earth beyond six of nine planetary boundaries", *Science Advances*, 9 (37), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>

SCHLESIER H. *et al.* (2024), "Measuring the Doughnut: A good life for all is possible within planetary boundaries", *Journal of Cleaner Production*, 448, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141447>

VAN VUUREN D.P., DOELMAN J.C., SCHMIDT TAGOMORI I. *et al.* (2025), "Exploring pathways for world development within planetary boundaries", *Nature*, 641, pp. 910-916. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08928-w>

WACK P. (1985a), "Scenarios: Uncharted waters ahead", *Harvard Business Review*.

WACK P. (1985b), "Scenarios: Shooting the rapids", *Harvard Business Review*.

WILLIAMS A., PEREGO P. & WHITEMAN G. (2025), "Boundary conditions for organizations in the anthropocene: A review of the planetary boundaries framework 10 years on", *Journal of Management Studies*, 62(4), pp. 1811-1846. <https://doi.org/10.1111/joms.13150>

Marine ecosystems and the challenges they face

Introduction

François Houllier

What lies in store for the ocean in the 21st century?

The continuum of observation, modelling and digital twins of the ocean

Pierre-Yves Le Traon, Pierre Serodes & Bertrand Chapron

Faced with the 'triple crisis' of climate change, biodiversity loss and pollution, understanding and predicting changes in the ocean requires greater integration between observations, numerical modelling and emerging digital twin technologies. This article examines the central role of the Global Ocean Observing System (GOOS), which combines in situ measurements (Argo floats, buoys, ships) and satellite observations (Copernicus/Sentinel programmes), in monitoring physical, biogeochemical and biological Essential Ocean Variables (EOVs).

We analyse how the exploitation of massive volumes of data, processed according to FAIR principles and enhanced by artificial intelligence, enables the predictability of ocean models to be improved and digital twins of the ocean (DTOs) to be developed. These dynamic virtual replicas aim to simulate sustainable management scenarios, anticipate extreme events and inform climate change adaptation policies.

The article highlights the major European initiatives (Destination Terre, OceanEye) that underpin this ambition, whilst emphasising the remaining challenges: ensuring the long-term viability of observation networks, improving biogeochemical modelling, and integrating technological innovations for a sustainable blue economy.

Tropical cyclones: new satellite capabilities, validation and oceanic response

Bertrand Chapron & Alexis Mouche

This article analyses recent advances in the use of synthetic aperture radar (SAR) for observing tropical cyclones and their interactions with the ocean. Unlike optical or infrared sensors, SAR enables high-resolution (kilometre-scale) estimates of surface winds, even in the most intense areas such as the eye of the cyclone. The Copernicus programme (Sentinel-1), supplemented by RADARSAT and the Canadian RCM constellation, has transformed point observations into global databases (CyclObs), useful for both operational forecasting and research. Validations, notably via airborne measurements from dedicated reconnaissance

flights, confirm the reliability of the reconstructed wind fields despite certain limitations (rain, artefacts). These data also enable analysis of the oceanic response: vertical mixing, surface cooling, upwelling of saltier and nutrient-rich waters, and sea-level anomalies. The combination of SAR, Argo profiles and modern altimetry thus enables a quantitative link to be established between atmospheric forcing and ocean dynamics, paving the way for more efficient coupled models and digital twins.

Risks and opportunities associated with adapting to sea-level rise

Gonéri Le Cozannet, Mirna Badillo-Interiano, Cécile Capderrey, Angélique Melet & Rémi Thiéblemont

It is now well established that sea-level rise will continue for centuries, eventually reaching several meters. The speed of this phenomenon will depend on future global warming levels and the sensitivity of the Greenland and Antarctic ice sheets to this warming.

This represents a major challenge for coastlines, including those in mainland France and its overseas territories. Rightly identified as a risk of marine submersion, coastal erosion, and the salinization of estuaries and coastal aquifers, sea-level rise adaptation can also represent an opportunity if the inevitable territorial restructuring to better manage coastal areas is combined with a restoration of space for sediments and ecosystems.

The ocean at the heart of the energy transition

The role of the ocean in the energy transition

Marion Cuif

Long neglected in climate policy, the ocean is now at the heart of carbon neutrality strategies. The emergence of "blue carbon" as a strategic focus of the National Low-Carbon Strategy thus imposes a dual mission: protecting and restoring coastal ecosystems. At the same time, geoengineering and offshore geological storage offer prospects for active carbon sequestration, but their environmental and societal uncertainties and their overall carbon footprint call for caution. Marine renewable energies constitute a major lever for decarbonization, with offshore wind power at the forefront. However, the integration of these infrastructures raises significant ecological and logistical challenges. Between nature-based solutions and the deployment of critical infrastructure, how can we define a maritime trajectory that reconciles the climate emergency with the preservation of marine ecosystems?

The National Offshore Wind Observatory: improving our understanding of biodiversity to inform the energy transition

Marion Cuif, Olivier Le Pivert & Maëlle Nexer

Established in 2022 by the French government, the National Offshore Wind Observatory (ONEM) aims to inform the public debate on the environmental impacts of offshore wind farms. While offshore wind is crucial for decarbonizing the French energy mix, its development must reconcile the energy transition with the preservation of marine biodiversity. According to the IPBES, offshore infrastructure constitutes a “change of use”, representing the second major pressure on marine biodiversity.

Initially endowed with € 50 million, ONEM has structured a strategic program to address scientific gaps and disseminate knowledge to stakeholders. As its budget is expiring, the observatory's future is uncertain. The authors actively advocate for the continuation of this initiative and call for a sustainable research strategy to effectively support public policy decisions.

Collective Scientific Expertise (ESCo) on the effects of offshore wind power on biodiversity

Cédric Bacher, Eugénie Cazaux, Marion Cuif, Olivier Le Pivert, Nathalie Niquil & Valérie Lallemand-Breitenbach

The Collective Scientific Assessment (ESCo) Offshore Wind Farms and Biodiversity, jointly conducted by Ifremer and the CNRS, provides an overview of current scientific knowledge on the effects of offshore wind farms and their associated grid connections on marine biodiversity and marine and coastal socio-ecosystems. Based on a systematic review of the international scientific literature, the assessment draws on more than 4,500 identified publications, including 411 articles selected for detailed analysis.

It therefore constitutes the most comprehensive state-of-the-art assessment currently available on this topic. The analysis addresses the effects associated with the various pressures generated by offshore wind farms, as well as the main uncertainties, knowledge gaps and mitigation measures documented in the scientific literature. It highlights effects that vary depending on ecological contexts, biological groups and technologies considered, while underlining the challenges related to cumulative effects, long-term monitoring and the transferability of results.

Offshore wind power: impacts and challenges of a new spatial constraint on fisheries

Adeline Bas, Sophie Léonardi, Manuel Bellanger, Hélène Buchholzer, Marjolaine Frésard, Juliette Jestin, Pascal Le Floc'h, Christelle Le Grand, Célya Martial, Huixin Wu & Olivier Thébaud

The expansion of offshore wind power, a central component of European and French energy strategies, is leading to increasing interactions with the commercial fishing industry. While the ecological impacts of these

infrastructure projects have prompted a growing body of research, the economic and social dimensions are now emerging as major research priorities.

This article outlines four research areas led by the AMURE Joint Research Unit, aimed at generating knowledge on these dimensions that can inform the planning of offshore wind farm development.

Tidal energy: a new sector to accelerate France's energy transition?

Grégory Germain, Christophe Maisondieu & Marion Cuif

Marine energy contributes to the energy mix of many countries. Among them, the kinetic energy of tidal currents offers significant potential development, with its key advantages being the excellent predictability and the concentration of energy in coastal areas. This energy is captured and converted into electricity by tidal turbines, which operate on the same principles as wind turbines.

Currently, the first industrial farms are being developed in the United Kingdom and the first pilot farms are expected to be deployed on the French coast by 2030. This article provides an overview of the main current developments.

Can maritime spatial planning serve as a catalyst for socio-environmental transitions?

Neil Alloncle, Adeline Bas & Céline Jacob

The European Integrated Maritime Policy aims to reconcile economic development with the protection of marine environments faced with the phenomenon of “blue acceleration”. In France, this policy is implemented through the National Strategy for the Sea and Coastline translated in MSP plans at a sea basin level, which organise maritime uses by integrating environmental, social and economic considerations. Initially implemented in parallel with maritime spatial planning, the development of offshore wind energy has gradually been integrated into the PSM plans, notably through the 2023 APER Law.

Taking the offshore windfarm planning as an example, this article shows how this integration enables better consideration of cumulative environmental impacts, areas that are sensitive both environmentally and economically, and interactions with other activities such as fishing. However, limitations remain: insufficient knowledge of the impacts, separate administrative procedures, and stakeholder participation that does not allow for the genuine co-construction of visions, objectives and actions.

Decarbonising shipping: the challenge of the decade for a maritime giant

Pierre Marty, Maximilien Simon & Lucas Leon

Maritime transport is the lifeblood of our globalized economy, carrying 80% of the goods we consume across the globe. Incredibly efficient and surprisingly

affordable, it is nonetheless a major contributor to CO₂ emissions and a key source of various forms of pollution. Yet maritime transport is at a historic turning point; its decarbonization is no longer an option, but a necessity.

This article delves into the environmental challenges, common technological solutions—such as new fuels and sail propulsion—and the economic and political obstacles that mark the path toward decarbonizing the maritime transport sector. We must act quickly and decisively now to meet climate commitments by 2050. A case study on the decarbonization of the French oceanographic fleet illustrates the challenges and opportunities to be seized.

How to ensure a healthy and productive ocean

One Health and the ocean:

An essential integrated approach

Wilfried Sanchez, Romane Lucq & Tristan Renault

Integrating the ocean into the One Health approach has become a strategic priority for informing public decision-making and supporting ecological and societal transitions. Yet public policies, observation systems, and funding mechanisms remain largely fragmented across the health, environmental, food, energy and maritime sectors. As a result, interconnected risks remain difficult to address, particularly in the context of global change.

Several key challenges must therefore be tackled, including the integration of still fragmented data, the development of interdisciplinary approaches, and the establishment of governance frameworks capable of linking human health, biodiversity, economic activities, and the functioning of marine socio-ecosystems. Achieving these objectives requires sustained investment in ocean observation and data infrastructures, as well as stronger involvement of local authorities, economic stakeholders, and civil society.

Towards an integrated approach to monitoring coastal marine ecosystems: challenges, mechanisms and prospects

Yannick Gueguen, Annie Fiandrino, Lucie Cocquempot & Wilfried Sanchez

In a context of global change, marine ecosystems, particularly coastal ones, are at the center of major environmental, economic, and societal challenges. Their complexity, resulting from the interaction between natural processes and human activities, requires the development of integrated observation approaches to better understand their functioning and evolution.

This article presents existing observation systems and their future perspectives, highlighting the structuring role of monitoring networks and research infrastructures, as well as the challenges related to data interoperability and management. It also emphasizes the

contribution of recent innovations, such as molecular approaches, imaging technologies, and artificial intelligence, to improve ecosystem characterization.

Human viruses: from wastewater to shellfish—how can consumers be protected?

Soizick F. Le Guyader, Marion Desdouts, Joanna Ollivier & Pascal Garry

French coastal areas play a major economic and tourism role thanks to shellfish farming and recreational fishing. However, for several decades, increased human activity along the coast has led to a decline in water quality and, consequently, in the microbiological quality of shellfish. In particular, oysters, which are consumed raw, are often implicated in outbreaks of viral gastroenteritis. Contamination occurs when wastewater is not adequately treated.

Oysters then concentrate viral particles during their physiological processes, and currently, norovirus represent the major risk associated with their consumption. Through a “One Health” approach linking human health, environmental health, and economic activity, preserving the microbiological quality of coastal waters will allow to protect consumers, sustain oyster farming, and preserve coastal ecosystems.

Plastic pollution in the ocean: current situation, knowledge gaps and levers for public action

Arnaud Huvet, Ika Paul-Pont, Xavier Cousin & Wilfried Sanchez

Marine plastic pollution is a major threat to the ocean. Present in the form of macro-, micro-, and nanoplastics, it affects all marine environments and originates from both land-based and maritime human activities. Plastics impact biodiversity through ingestion, entanglement, habitat degradation, and transport of chemical or biological contaminants. Micro- and nanoplastics, along with associated chemical compounds, also raise health concerns through contamination of the food chain.

Despite scientific progress, uncertainties remain regarding their concentrations, long-term effects, and risks to human health. Priorities include improving detection methods, standardizing methodologies, mapping risks, and assessing the effectiveness of public policies. Coordinated international action is considered essential to sustainably reduce this pollution.

Combining a healthy and productive ocean in the French Overseas Territories: aquaculture in and for the environment in French Polynesia

Guillaume Mitta, Cristián J. Monaco, Simon Van Wynsberge & Thomas Camus

French Polynesia faces significant challenges, including food autonomy and the impact of climate change on its ecosystems. Although 85% of food supplies are imported, aquaculture offers a sustainable solution to improve food security while preserving the environ-

ment. Increasing pressures on watersheds, overfishing, and pollution threaten the corals, leading to a proliferation of harmful macroalgae. New approaches, such as fisheries regulation and aquaculture, are crucial.

Ifremer is developing solutions like the aquaculture of low trophic-level species, particularly bivalves, and integrated multitrophic aquaculture, which optimize resources while minimizing impacts. Initiatives in restorative aquaculture aim to reseed herbivorous species, essential for the regeneration of marine ecosystems. These efforts are designed to enhance the resilience of Polynesian ecosystems in the face of current challenges.

Aquaculture at a crossroads: sustainable production in a changing world

Tristan Macquet & Benjamin Denjean

Global aquaculture is growing, but on a fragile model: carnivorous species fed on fishmeal, monoculture systems, dependency on external inputs. France, often without realising it, has taken a different path: 70% of its aquaculture production relies on species that filter water, require no exogenous feed and integrate naturally into coastal ecosystems. This is not a lag. It is a lead. A lead confirmed by the thermodynamics of trophic networks, carbon footprint data, and 30 years of comparative research on the agroecological transition on land.

This article explores what it means to produce sustainably in a world of increasing volatility: why low-trophic aquaculture is structurally more resilient, how Integrated Multi-Trophic Aquaculture has proven itself at scale in China, and why France, if it does not rapidly build out its emerging sectors, risks quietly eroding an advantage that decades cannot easily rebuild.

Trawling and Marine Protected Areas: understanding the many issues at stake, proposing collaborative solutions

Clara Ulrich

On 11 April 2025, Ifremer (the French Research Institute for the Exploitation of the Sea) published a scientific report discussing a subject that is as complex as it is high-profile: “should trawling be banned in marine protected areas (MPAs)?” This question, at the heart of the tension between preserving biodiversity and sustaining economic activities, connects the expectations of civil society, the concerns of scientists and the challenges faced by stakeholders in marine-based economic sectors.

As France hosted the 3rd United Nations Ocean Conference, this debate had—and continues to have—particular resonance. The report brought together the expertise of a group of 30 Ifremer scientists from various disciplines (ecology, economics, fisheries science) to inform public policies. Their work highlights a nuanced reality: MPAs are not homogeneous entities, and trawling, which ecological impact is well documented, cannot be addressed without considering its, economic and social dimensions, as well as the risks

linked to fishing effort displacement in case of interdiction in given areas.

Gaining a better understanding of dolphin bycatch in the Bay of Biscay in order to reduce it

Clara Ulrich, Jérôme Spitz & Pierre Petitgas

At the end of 2025, the partners in the Delmoges scientific project (DELphinus MOUvements GESTion) published the final results of this ambitious project, which aimed to study, for the first time, the mechanisms behind the increase of incidental capture of common dolphins in the Bay of Biscay since 2016 and to propose ways of better reconciling fishing with the conservation of common dolphins.

This interdisciplinary project brought together ecologists, fisheries scientists, modellers, economists and researchers in management sciences. It generated a wealth of new knowledge, providing a comprehensive and up-to-date scientific overview of the interactions between common dolphins and their environment (physical factors, pollutants, prey) and with fishing activities.

Understanding the deep ocean

The challenges of understanding the deep sea

Valérie Chavagnac, Pierre-Yves Le Meur, Pierre-Marie Sarradin, Clémence Cotten, Céline Dégremont, Bérengère Husson, Violette Larrieu & Yacine Moufid

The deep ocean has long been considered inaccessible, dark, and lifeless. The priority research program and equipment (PEPR) “Deep Sea: Knowledge, Uses, Commons” (France 2030, 10 Deep Sea Challenge) aims to acquire fundamental knowledge about the deep sea, broadly defined here from the ocean floor and its substrate to the entire water column, considered as sites of energy and matter exchanges, and as habitats for marine organisms.

The interdependence between solid earth, the water column, and the biosphere is addressed through the various scientific challenges of the ocean, such as the biological carbon pump and its link to climate regulation, biodiversity and its resilience in a variety of underwater landscapes, as well as energy transfers and their impacts on the abiotic and biotic environment.

This production of fundamental knowledge does not operate disconnected from society, and takes into account the social, environmental, political, and economic issues that shape ocean spaces. It re-examines our knowledge and capacity for action, our rights, duties and responsibilities towards these environments.

The French Oceanographic Fleet and access to the deep sea: strategic and technological challenges

Maximilien Simon, Jan Opderbecke & Christine David

The French Oceanographic Fleet (FOF), operated by Ifremer, is a key player in the exploration of the deep sea. Faced with strategic issues—climate, palaeoclimate, geology, biodiversity and natural hazards—it deploys ships and underwater vehicles to address scientific challenges. With a global deployment capability and innovative technologies (robotics, AI, digital twins), the FOF is taking on a threefold challenge: to explore far, deep and on the long term. The FOF currently faces several capacity and technological challenges regarding access to the deep sea, notably the replacement of the ocean-class vessel L'Atalante.

International governance of the deep ocean: a complex yet structured network of rules and institutions

Dr Bleuenn Guilloux & Dr Youna LBL Lyons

The deep ocean is subject to a dense legal and institutional framework, structured around the United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) and the institutions that contribute to its implementation.

This article provides an overview of this international governance by examining the main regimes applicable to several major maritime activities conducted in the deep ocean, including deep-sea mining, fishing, marine genetic resources, marine scientific research, submarine cables, and certain activities related to combating climate change.

It highlights the diversity of institutional mechanisms employed, as well as the potentially central role of the BBNJ Agreement in strengthening cooperation and coordination between institutions. Far from being a lawless space, the deep ocean thus appears as a complex yet structured area of governance.

The deep sea: the perspective of the Ifremer Stakeholder Committee

Diane Vaschalde, Céline Liret, Christophe Sirugue, Geneviève Pon & Sébastien Treyer

Ifremer's stakeholder committee has been asked to highlight the main issues related to the deep sea, in order to inform research questions. About fifteen different actors from civil society have been interviewed. The committee underlines the diversity of representations and the importance of clarifying definitions. The committee also advocates for knowledge, by supporting exploration efforts, but also argues for a collective discussion about explorations' purposes and uses.

Lastly, the committee raises questions that they find important to consider at the science-society interface: about long-term observation, economic rationales, temporal dimensions at stakes, non-human considerations and boundaries of technological innovation.

Mapping France's resources and assets

25 years of strategic port management in France: three paradigm shifts (1999–2025)

Éric Foulquier & Antoine Frémont

In 1999, the Court of Auditors published a report on French seaport policy that marked the starting point of a deep transformation. This warning about the competitiveness of French ports led to the 2008 reform, which followed the two major reforms of 1965 on autonomous ports and 1992 on cargo handling. What distinguishes the two periods 1965–1999 and 1999–2025 is the acceleration of necessary transformations in an increasingly complex and unstable context.

Since 1999, more than twenty public reports have informed the government on various aspects of the appropriate response to these successive challenges. While these reports do not in themselves constitute a national maritime policy, they provide a solid foundation of knowledge. An analysis of this literature reveals the gradual transformations of seaport paradigm.

Three distinct phases can be identified to track the evolution of the idea of the seaport: the modernization of port infrastructure, the cautious emergence of the port as a developer, and the rise of the port as an entrepreneurial entity.

A survey of French public ocean research

Hervé Moulinier & Antoine Dosdat

Characterizing the adequacy of French public research forces with respect to the challenges facing the Ocean, requires a prior mapping of these forces. This was the ambition of the study published in 2021, and it is the objective of its current update. The study is based on a new methodology, that better specifies the thematic scope of this research and builds the inventory using the data from the public evaluations of each of the core entities, to reduce the need and bias for surveys.

Based on these data, it can be stated that marine science and technology (MST) mobilize in 222 entities a workforce of around 7,000 scientific staff in full-time equivalents.

This article reviews the results of this inventory and the different types of exploitation that have been made of it since then. It underlines the importance of having this geolocated inventory to evaluate public policies in MST.

Mapping the players in the blue economy

Nathalie Mercier-Perrin

As the world's second-largest maritime nation, France possesses exceptional oceanic potential, at the crossroads of energy, industrial, environmental and geopolitical challenges. This space, long perceived as peripheral, is now establishing itself as a strategic hub: 'blue gold', as described by Nathalie Mercier-Perrin, refers to a global wealth that is at once economic, ecological and sovereign. This reality rests largely on the overseas

territories, which give France a unique global maritime presence. The maritime economy is organised around multiple stakeholders—industrial, scientific, institutional and territorial—who agree on one point: the ocean is a lever of power as much as it is an area under strain. Climate pressure, the erosion of biodiversity, international competition and changing patterns of use necessitate a systemic approach. This article maps the stakeholders in France's blue economy and the ocean-related challenges they identify, from the perspective of integrated governance.

A survey of French non-governmental organisations working to protect the marine and coastal environment
Gauthier Carle

French civil society mobilized for the protection of marine and coastal environments forms a heterogeneous landscape of NGOs: generalist and specialized associations, scientific foundations, managers of natural areas, local associations, platforms and coalitions.

This article maps these actors by showing how they contribute to making the ocean a cross-cutting public cause. Drawing on the main drivers of pressure identified by IPBES, it analyzes the mobilization fronts of this civil society, as well as its main repertoires of action, conditions of influence and resources.

Miscellany

Strategic foresight and planetary boundaries: building a new framework for possible futures
Pierre-Baptiste Goutagny

Exploring possible futures for businesses must now take into account the physical finitude of the world. Indeed, the crossing of planetary boundaries is disrupting business activities and rendering traditional strategic approaches largely ineffective. Consequently, scenario-based foresight—a valuable tool for thinking about uncertainty and the long term—must itself incorporate these dimensions in order to rise to the level of contemporary strategic challenges.

With this in mind, the IF Initiative action research programme, led by Carbone 4 in collaboration with partner companies and research teams, aims to develop a strategic and forward-looking framework tailored to these physical and systemic challenges. What guiding principles does such a forward-looking approach seek to address, and what does it deliver for the organisations that participate in and adopt it?

Issue editor:
François Houllier

Ont contribué à ce numéro



D.R.

Neil ALLONCLE est directeur de projet planification maritime et littorale au Centre d'études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA).

Il contribue à l'appui des services de l'État pour l'élaboration des politiques de planification maritime, ainsi qu'à celui des collectivités littorales pour leurs politiques d'adaptation au changement climatique. Il est également impliqué dans différentes initiatives de coopération transfrontalière visant à harmoniser et articuler les politiques de planification maritime au niveau européen.



D.R.

Cédric BACHER est cadre de recherche à l'Ifremer. Il a animé le programme national de l'institut sur les écosystèmes marins côtiers de 2004 à 2008, puis dirigé l'unité de recherche « Dynamiques des écosystèmes côtiers (DYNECO) » de 2015 à 2023.

Ses travaux portent sur la modélisation mathématique et statistique des écosystèmes marins soumis à différents facteurs de changement, notamment les pressions anthropiques et la variabilité climatique, les interactions physique-biologie, en lien avec le cycle de vie des espèces, ainsi que les interactions trophiques. Depuis 2023, il est copilote scientifique de l'Expertise scientifique collective (ESCo) sur les effets des éoliennes en mer sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers.



D.R.

Mirna BADILLO-INTERIANO est doctorante en géographie au BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), spécialisée dans l'évaluation des risques climatiques en milieu insulaire.

Sa thèse s'inscrit dans le cadre du projet de recherche FUTURISKS, piloté par l'Université de La Rochelle (Virginie Duvat et Xavier Bertin), et visant à améliorer la compréhension des risques climatiques côtiers dans les Outre-mer insulaires tropicaux français, notamment en Polynésie française. Diplômée d'un master en génie côtier (Université de Montpellier), elle a travaillé sur des projets d'évaluation et de gestion des risques côtiers (CEREMA, EGIS).

Elle soutient le chapitre sur les écosystèmes côtiers et océaniques du 7^e rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat).



D.R.

Adeline BAS est chercheuse en économie (économie de l'environnement, économie institutionnelle et économie bleue) à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). Ses recherches portent sur l'analyse des politiques publiques liées au milieu marin.

Après avoir étudié les enjeux autour de la séquence Éviter-Réduire-Compenser appliquée aux aménagements maritimes, elle s'intéresse désormais à la gouvernance à différentes échelles et aux jeux d'acteurs adossés aux politiques de l'éolien en mer et de la planification de l'espace maritime en France en mobilisant des approches qualitatives.

Elle participe également à des évaluations socio-économiques portant sur les secteurs de l'économie bleue.



D.R.

Manuel BELLANGER est chercheur en économie des institutions à l'Ifremer et membre de l'UMR AMURE. Ses recherches examinent comment les règles, les normes, et les organisations structurent les comportements des acteurs et influencent les modes de gouvernance des activités maritimes.

Ses travaux portent en particulier sur les conditions de la durabilité des usages de l'océan, sur les conflits de gouvernance à l'interface de plusieurs secteurs, et ainsi que sur la gouvernance des secteurs émergents de l'économie bleue, dont l'éolien en mer.



D.R.

Hélène BUCHHOLZER est doctorante en économie à l'Université de Bretagne Occidentale. Son travail de thèse porte sur l'étude de la vulnérabilité des entreprises de pêche face à la mise en place de parcs éoliens en mer. Elle s'intéresse en particulier à leur capacité à s'adapter à ces transformations spatiales, avec un terrain d'étude centré sur la Normandie.

En croisant plusieurs disciplines, elle cherche à comprendre quels déterminants permettent à ces entreprises de s'ajuster, et comment ces déterminants sont mobilisés dans le temps. Cette approche permet d'aborder la relation entre pêche et éolien *offshore* sous un angle nouveau, au-delà des études d'impact traditionnelles.



D.R.

Thomas CAMUS est un ingénieur de recherche en expérimentation animale, spécialisé en aquaculture tropicale.

Membre de l'Unité Ifremer « Ressources Marines en Polynésie française » depuis 2020, il travaille notamment sur la diversification aquacole d'espèces de bas niveau trophique, en lien avec le développement de filières commerciales et de projets d'aquaculture de restauration. Il est l'auteur de 10 articles de rang A.



D.R.

Cécile CAPDERREY est biologiste de formation, titulaire d'un doctorat en Écologie (Université Lyon 1, 2013) et chef de projet au BRGM. Elle travaille sur les questions d'adaptation basées sur les solutions fondées sur la nature (SFN) en milieu littoral, avec un intérêt particulier pour la restauration écologique.

Ses travaux portent sur l'appui à la mise en œuvre de politiques environnementales et sur la construction de cadres méthodologiques pour évaluer le potentiel des SFN dans des questions d'adaptation. Elle a travaillé, par exemple, en France hexagonale, en Nouvelle-Calédonie et en République de Maurice.

Elle est impliquée dans plusieurs cadres nationaux et européens de mise en œuvre de politiques publiques (directives-cadres sur l'eau et le milieu marin) et coordonne également le développement de la plateforme LITTOREX dédiée à la restauration écologique des écosystèmes littoraux et marins, en partenariat avec l'Office français de la Biodiversité.



D.R.

Gauthier CARLE est directeur général de la plateforme Océan & Climat. Il travaille à traduire les connaissances scientifiques en actions politiques concrètes et ainsi à renforcer l'intégration du système océan-climat-biodiversité dans les politiques internationales, européennes et françaises. Il coordonne notamment le Comité France Océan.

Il est diplômé d'un master en Politiques et Pratiques des Organisations internationales à Sciences Po Grenoble et d'un master en Gouvernance de la Transition, Écologie et Sociétés à AgroParisTech.

Eugénie CAZAUX, docteure en géographie, est cheffe de projet au sein de la coordination de l'Appui aux politiques publiques (APP) à l'Ifremer.

Ses travaux portent sur les relations entre environnement, action publique et territoires côtiers, avec une attention particulière portée à l'interface entre expertise



D.R.

scientifique et décision publique. Elle coordonne actuellement l'Expertise scientifique collective (ESCo) « Éoliennes en mer et biodiversité », conduite conjointement par l'Ifremer et le CNRS, sur les effets des éoliennes en mer sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers.

Bertrand CHAPRON, docteur en mécanique des fluides, est chercheur à l'Ifremer, au sein de l'équipe Satellite et Interface Air-Mer du Laboratoire d'Océanographie physique et spatiale. Ses travaux de recherche sont actuellement soutenus par le conseil européen de la Recherche (ERC Synergy STUOD Stochastic Transport in Upper Ocean Dynamics).

Il est également impliqué dans les études de nouvelles missions d'observation des océans (CNES, ESA, NASA), et la définition de démonstrations de Jumeaux numériques.

Valérie CHAVAGNAC est directrice de Recherche au CNRS, spécialiste en géochimie marine et hydrothermalisme. Après une formation en sciences de la terre, elle a développé une expertise unique dans l'étude des fluides hydrothermaux, des interactions eau-roche et des sédiments marins, avec un focus particulier sur les grands fonds océaniques et les processus géochimiques associés.

Ses travaux, menés principalement au sein du Laboratoire Géosciences Environnement Toulouse (GET), ont permis d'avancer significativement la compréhension des systèmes hydrothermaux, de leur composition géochimique (métaux traces, isotopes du Sr, Nd, Li, Pb) et de leur rôle dans les cycles biogéochimiques océaniques. Elle contribue aux activités de recherche de l'observatoire fond de mer EMSO Açores depuis 2010 et développe de l'instrumentation sous-marine pour les milieux marins extrêmes. Elle est membre du conseil scientifique de l'Institut Terre & Univers du CNRS.



D.R.

Lucie COCQUEMPOT travaille à la coordination des réseaux d'observation à l'Ifremer depuis 2019. Elle est membre des instances de gouvernance de plusieurs infrastructures nationales de recherche dédiées à l'océan et contribue, depuis sa création, au développement du French Ocean Observing System en tant que membre de son secrétariat exécutif.

Ingénieure en océanographie physique diplômée de l'ENSTA Bretagne (2004), elle s'est spécialisée dans l'observation côtière, la gestion des données marines et la coordination de systèmes d'observation multidisciplinaires.

Son parcours, à l'interface entre recherche, ingénierie et coopération institutionnelle, l'a conduite à développer

des stratégies d'observation interdisciplinaires associant sciences participatives, valorisation des savoirs locaux et démarches de science ouverte.

Elle coordonne ou contribue à plusieurs projets européens structurants dans le domaine de l'observation de l'océan et participe également à plusieurs initiatives internationales, au sein du comité de pilotage d'AtlantOS, en tant que directrice exécutive et co-présidente du groupe consultatif scientifique d'EuroGOOS, ainsi que comme co-responsable d'un groupe de travail de l'Ocean Best Practices System consacré aux protocoles et bonnes pratiques pour les observations côtières dans les pays disposant de ressources limitées.

Convaincue de la nécessité de construire un système mondial d'observation de l'océan durable et partagé, elle contribue à l'évolution de la gouvernance de l'observation océanique dans une approche orientée vers les usages, la coopération internationale et la diffusion des connaissances.

Clémence COTTEN est ingénieure en biologie marine de formation et s'est spécialisée dans la gestion de données depuis son recrutement au sein de l'Ifremer (SISMER) en 2018. Elle est responsable FAIRisation des données du pôle Océan Odatis et gestionnaire de la base de données d'échantillons biologiques des campagnes en mer françaises.

Son objectif est d'accompagner la communauté scientifique marine pour améliorer la pérennité et la réutilisabilité des données. Pour cela, elle s'investit dans divers projets et programmes tels que les PEPR Grands Fonds Marins et BRIDGES.



D.R.

Xavier COUSIN est chercheur INRAE au sein de l'unité MARBEC (MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation). Physiologiste, il s'intéresse à l'effet des polluants sur les poissons et en particulier aux fonctions et aux processus déterminants pour la pérennité des populations, tels que la croissance, la reproduction ou le comportement.

Depuis plus de 10 ans, il s'intéresse en particulier aux effets des microplastiques et des produits chimiques associés. Pour prolonger cette activité il développe depuis plusieurs années une activité importante d'appui aux politiques publiques illustrée par sa participation aux négociations en cours pour un traité contre la pollution plastique.



D.R.

Marion CUIF coordonne les activités de recherche, d'innovation et d'expertise de l'Ifremer sur les énergies marines renouvelables. Experte des questions maritimes à l'interface entre science et politiques publiques, elle a précédemment œuvré au sein de ministères et d'établissements publics. Ingé-

nieure des Ponts, des Eaux et des Forêts et docteure en écologie marine, elle pilote depuis 2024 le thème « Faire de l'océan un acteur de la transition énergétique » de l'Ifremer.

Christine DAVID est directrice adjointe et directrice scientifique de la Flotte océanographique française. Elle a été directrice-adjointe à l'Institut polaire français Paul-Émile Victor (IPEV), ainsi que directrice adjointe de l'Institut universitaire européen de la mer (IUEM) en charge de l'observatoire marin.

Céline DÉGREMONT est chargée de mission à la direction scientifique de l'Ifremer depuis 2017. Elle occupe le rôle de cheffe du programme du PEPR Grands fonds marins depuis sa construction en 2024 et tient également ce rôle dans le PPR Océan & Climat depuis 2021. Après un master en chimie de l'environnement, elle a débuté sa carrière en tant que coordinatrice du programme de recherche Seine-Aval, avant de s'intéresser à la protection de l'environnement au sein de l'association Bretagne Vivante, en tant que responsable du réseau des réserves et du pôle connaissance et conservation.

Ayant rejoint la direction scientifique de l'Ifremer, elle a d'abord été principalement en charge des politiques incitatives de l'Institut et a étendu progressivement ses compétences dans l'ingénierie de projets de programmes nationaux, en lien avec de multiples partenaires et équipes scientifiques.



D.R.

Benjamin DENJEAN est ingénieur environnemental, diplômé de Centrale Nantes (2009), également titulaire d'un master en biophysique de l'Université des Sciences de Norvège (NTNU) et d'un MBA de l'ESSEC. Il a cofondé et dirigé pendant 7 ans Le Paysan Urbain à Marseille, dispositif pionnier mêlant production agricole urbaine, insertion professionnelle et pédagogie.

Fort de cette expérience de structuration et de développement de projets innovants, il met aujourd'hui ses compétences au service du Paysan Marin, association soutenant l'émergence de nouvelles aquacultures au service de la résilience des territoires.

Marion DESDOUITS est chercheuse en virologie au laboratoire Santé Environnement Microbiologie de l'Unité MASAE de l'Ifremer, depuis 2016. Après un cursus de biochimie et biologie cellulaire, et un master 2 de virologie, elle a soutenu en 2011 une thèse à l'Institut Pasteur de Paris sur les interactions entre virus et cellules musculaires, puis un post-doctorat à l'Institut Curie sur la réplication et la détection du VIH dans les macrophages humains.

À l'Ifremer, ses travaux portent sur la diversité et la persistance des virus entériques dans l'environnement littoral. Elle étudie notamment les norovirus



D.R.

et sapovirus, responsables de gastro-entérites, à l'aide d'outils novateurs de réplication *in vitro* et d'approches métagénomiques. Ces recherches visent à mieux comprendre les mécanismes de la contamination du littoral et des coquillages par les virus humains et les risques sanitaires associés, afin de proposer des solutions de prévention ou de traitement plus efficaces.



D.R.

Antoine DOSDAT est ingénieur agronome de formation. Il a développé dans la première partie de sa carrière à Ifremer une expertise dans le domaine des systèmes de production aquacoles et de leurs interactions avec les environnements marins.

Dans une deuxième phase, après avoir été adjoint du directeur scientifique de Ifremer, il en a été

directeur des Affaires internationales et européennes de 2004 à 2011. De 2011 à 2020 il a été directeur du Centre Ifremer de Bretagne, le plus important site de recherche de l'institut et conseiller de son président.

Auteur de plus de 100 articles scientifiques, coordinateur de nombreux projets européens en sciences marines, expert auprès du Conseil International pour l'Exploration de la Mer, il a été vice-président de l'European Marine Board et de l'European Fisheries and Aquaculture Organisation, membre du Conseil économique et social de la région Bretagne et vice-président du pôle de compétitivité MER Bretagne Atlantique.



D.R.

Annie FIANDRINO est cadre de recherche en modélisation à Ifremer depuis 2001. Durant 20 ans, ses travaux de recherche ont été axés sur l'étude du fonctionnement des milieux marins côtiers et des interactions avec les ressources exploitées qu'ils hébergent. L'accroissement des apports d'azote et de phosphore provenant des bassins versants, notamment depuis les années

1960 est reconnu comme étant la cause majeure de la dégradation environnementale des écosystèmes côtiers.

Dans ce contexte, elle a initié le développement et l'amélioration continue d'un outil d'aide à la gestion des écosystèmes lagunaires eutrophisés (modèle GAMELag). Ce modèle constitue aujourd'hui un outil opérationnel intégré à la démarche « Flux Admissibles en nutriments pour les lagunes des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse » portée par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) Rhône Méditerranée Corse et déclinée dans la plupart des SAGE « lagunes » de ce bassin. Cette démarche vise à obtenir, pour une lagune donnée, des flux de nutriments compatibles avec

un bon état écologique. Les structures de gestion qui souhaitent mettre en œuvre cette démarche bénéficient de l'appui scientifique et technique de la Tour du Valat à qui l'outil a été transféré pour porter cette mise en œuvre opérationnelle.

En 2021, elle a rejoint la direction scientifique de l'Ifremer sur un poste de référent thématique « modélisation et environnements côtiers » à mi-temps. Avec cette mobilité, elle a souhaité « passer de l'opérationnel au stratégique » et s'ouvrir aux activités pluridisciplinaires de l'Institut.

Depuis cette date, en parallèle à ses travaux de recherche, elle assure pour la direction scientifique le suivi des dossiers relatifs à la modélisation et à l'observation des environnements côtiers.



D.R.

Éric FOULQUIER est géographe, enseignant-chercheur à l'Université de Bretagne Occidentale (UBO). Il est membre de l'unité mixte de recherche du CNRS Littoral, Environnement, Géomatique, Télédétection.

Ses travaux se sont d'abord intéressés aux mutations de la gouvernance portuaire dans les pays sud-américains, là où le modèle du *landlord port* s'est installé dans

les années 1990.

En 2014, il coordonne un ouvrage *Gouverner les ports de commerce à l'heure libérale* aux éditions du CNRS, qui s'intéresse à la mise en œuvre de ce modèle de gestion portuaire en France, en Italie et en Espagne. Depuis une dizaine d'années, il s'attache à mieux comprendre les voies possibles d'une écologisation des ports de commerce.

Avec Gaëlle Gueguen-Hallouët, spécialiste de droit portuaire à l'UBO, il crée, en 2024, la chaire Transitions Portuaires et Maritimes, soutenue par la fondation de l'université de Brest. La chaire TPM associe des acteurs institutionnels de la région Bretagne et des entreprises des différentes places portuaires régionales. Elle se veut une communauté de savoirs et un espace de dialogue science-société, apte à accompagner les mutations portuaires.



D.R.

Antoine FRÉMONT est professeur du Conservatoire national des Arts et Métiers, titulaire de la chaire « Transports, flux et mobilités durables » depuis mars 2022.

Il est membre des conseils scientifiques du *think tank* TDIE (Transport Développement Intermodalité Environnement) et membre du conseil d'orientation du grand port fluvio-maritime de l'axe Seine HAROPA PORT. Il préside

l'association AFITL (association française des instituts de transport et logistique).

Ses activités de recherche portent principalement sur le transport maritime, les ports et les chaînes logistiques internationales dans le contexte de la mondialisation et de la métropolisation.



D.R.

Marjolaine FRÉSARD est enseignante-chercheuse en sciences économiques à l'UMR AMURE, Université de Bretagne Occidentale. Ses recherches portent sur les phénomènes de compétition spatiale qui impactent les activités économiques exploitant les ressources naturelles renouvelables dans les socio-écosystèmes marins.

Plus particulièrement, elle analyse les impacts économiques du développement des parcs éoliens en mer sur l'activité de pêche professionnelle, à travers le cadre théorique élargi de la vulnérabilité, ainsi que les possibilités d'atténuation à travers la mise en place de politiques publiques.

Pascal GARRY, chercheur en bactériologie, est arrivé à l'Ifremer en 2011 après avoir été en poste à l'Institut du Porc où il menait des travaux sur la contamination de l'ensemble de la filière porcine et de son environnement par des pathogènes humains. Coordinateur du Laboratoire national de Référence pour la Microbiologie des coquillages, ses missions allient gestion des activités de l'équipe, animation des réseaux des laboratoires agréés et assistance à la direction générale de l'Alimentation.

Il participe également aux projets de recherche du laboratoire, tels qu'Obepine+. Depuis quelques mois, il assure les fonctions de responsable de l'unité Microbiologie Aliment Santé et Environnement regroupant le laboratoire Santé Environnement et Microbiologie et le laboratoire Écosystèmes Microbiens & Molécules Marines pour les Biotechnologies.



D.R.

Grégory GERMAIN est chercheur en mécanique des fluides, spécialisé en hydrodynamique navale et en énergies marines renouvelables au sein du laboratoire d'Hydrodynamique Marine de l'Ifremer. Ayant soutenu sa thèse en 2002, il obtient son HDR (Habilitation à Diriger des Recherches) en 2014.

Depuis 24 ans, il coordonne les projets scientifiques liés à l'utilisation du bassin à houle et courant de l'Ifremer à Boulogne-sur-Mer où il a dirigé une vingtaine de thèses. Auteur de nombreux articles scientifiques sur des sujets relatifs aux EMR et au comportement hydrodynamique des navires scientifiques et des structures en mer, il dirige le laboratoire commun Verti-Lab qui a obtenu le prix Carnot 2025 de la recherche partenariale avec une PME.



D.R.

Pierre-Baptiste GOUTAGNY est doctorant CIFRE en sciences de gestion à l'IAE Lyon School of Management – Université Jean Moulin Lyon 3, en partenariat avec le cabinet Carbone 4, emlyon business school et Strate, école de *design*. Sa recherche, co-dirigée par Bertrand Valiorgue (emlyon business school) et Estelle Berger (Strate), porte sur

le rôle performatif des instruments prospectifs dans la redirection des organisations vers des futurs compatibles avec les limites planétaires.

Au sein de Carbone 4, il contribue aux travaux du projet IF Initiative, démarche de recherche-action au croisement des sciences du système Terre, des sciences de gestion, du *design*, qui réunit un collectif d'entreprises partenaires et plusieurs équipes de recherche pour développer un nouveau référentiel de prospective stratégique. Ses travaux s'inscrivent également dans la chaire Carbone 4 « Stratégie en Anthropocène » à emlyon business school.

Avant d'engager cette recherche doctorale, il a contribué pendant plusieurs années dans des cabinets de conseil en stratégie et en design à des démarches de prospective et de pilotage de programmes de transformation auprès de comités de direction.



D.R.

Yannick GUEGUEN est ingénieur agronome et docteur en sciences agronomiques de formation. Chercheur senior en écologie marine à l'Ifremer, il dirige depuis 2024 l'Unité COAST, dédiée à l'observation et à l'étude des écosystèmes marins côtiers. Au cours de son parcours, mené au sein de différents unités de recherche d'Ifremer et d'UMR, il a développé des compétences en

écologie marine, en surveillance environnementale, en interactions hôte-pathogène et en santé des mollusques bivalves.

Ses travaux portent notamment sur les écosystèmes côtiers et conchylicoles, la qualité du milieu marin ainsi que les réponses des organismes marins aux changements environnementaux. Il a coordonné plusieurs programmes de recherche nationaux et partenariaux, en métropole comme en Polynésie française, et contribue au pilotage de dispositifs nationaux de surveillance et d'évaluation de l'état écologique du littoral.

Bleuenn GUILLOUX occupe une chaire de professeure junior en droit international public à La Rochelle Université au sein de l'UMR LIENSs. Ses recherches portent sur le droit international de la mer, la gouvernance de l'océan, la protection du milieu marin et de la biodiversité marine, avec une attention particulière au nexus océan-biodiversité-climat et aux interactions entre droit, sciences et politiques environnementales.



D.R.

Docteure en droit international public, lauréate d'un prix de thèse en droit de la mer, elle a été boursière des Nations unies et chercheuse postdoctorale en Allemagne (Kiel) et en France (Brest). Elle participe à plusieurs réseaux et groupes d'expertise consacrés à la gouvernance de l'océan et aux enjeux relatifs à l'océan profond, parmi lesquels l'association ACOPS France.



D.R.

François HOULLIER est président-directeur général de l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) depuis septembre 2018.

Ancien élève de l'École Polytechnique (X78) et de l'École nationale du Génie rural, des Eaux et Forêts (ENGREF), il est titulaire d'un doctorat en biométrie forestière de l'Université Claude Bernard-Lyon I et habilité à diriger des recherches. Biologiste de formation, ses domaines de recherche incluent la modélisation en écologie et biologie végétale, ainsi que l'évaluation des ressources.

Sa carrière a débuté à l'Inventaire forestier national (IFN), avant qu'il ne devienne professeur à l'ENGREF et directeur de l'Institut français de Pondichéry (Inde) de 1994 à 1997. Il a ensuite dirigé l'unité mixte de recherche AMAP « Botanique et bio-informatique de l'architecture des plantes » (CIRAD, CNRS, Inra, IRD, Université Montpellier-II) jusqu'en 2002, puis occupé diverses fonctions de direction à l'Inra. Il a été PDG de l'INRA de 2012 à 2016, président de l'Université Sorbonne Paris Cité de 2016 à 2018, et a porté l'initiative d'excellence Université de Paris.

Membre de l'Académie d'Agriculture de France et de l'Académie des Technologies, il préside également AllEnvi (alliance nationale de coordination des recherches en environnement) depuis 2020.



D.R.

Arnaud HUVET est chercheur à l'Ifremer au sein du laboratoire LEMAR (Laboratoire des sciences de l'Environnement marin). Il développe des recherches sur le devenir et les impacts des microplastiques et des déchets en mer.

Spécialisé en physiologie, il s'attache essentiellement à comprendre les impacts que subissent les organismes marins

face aux pressions anthropiques en environnement marin côtier, essentiellement les microplastiques et les nanoplastiques.

Bérengère HUSSON est ingénieure en halieutique et docteure en biologie marine. Après une thèse sur les

écosystèmes chimiosynthétiques des sources hydrothermales, elle a débuté un postdoctorat à Tromsø au sein de Havforskningssinstituttet (Institut de recherche marine de Norvège) avant d'y être définitivement embauchée. Elle y a notamment travaillé sur l'impact du changement climatique sur les écosystèmes marins de Norvège et de l'Arctique, sur les risques liés aux impacts anthropiques cumulés, et sur les évaluations d'état des écosystèmes.

Après sept ans dans l'institut, elle rentre en France en tant que chargée de mission scientifique CNRS rattachée à l'unité de recherche Géo-Océan pour le PEPR Grands Fonds Marins. Elle participe à la coordination et à l'animation du programme.



D.R.

Céline JACOB est chercheuse à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer). Ses travaux de recherche portent sur les enjeux de transition du secteur aquacole vers des systèmes de production plus résilients et durables, en tenant compte des dispositifs de régulation et de gouvernance au niveau territorial.

Plus largement, elle s'intéresse à la mise en œuvre des politiques publiques et à l'adaptation des activités économiques maritimes aux enjeux de la durabilité. Elle a participé à divers projets européens pluridisciplinaires liés au développement et à la planification spatiale des secteurs de l'économie bleue.



D.R.

Juliette JESTIN, après un master en politiques urbaines à l'Université Paris Dauphine, réalise une thèse en sciences sociales au laboratoire AMURE à Brest, dans le cadre du projet EOLEMÉR financé par l'Ademe.

Ses travaux portent sur les compensations territoriales liées au développement de l'éolien en mer en Bretagne, en particulier sur les négociations, les compromis et

les rapports de pouvoir entre les acteurs territoriaux, les développeurs et l'État.

Valérie LALLEMAND-BREINTENBACH est directrice de la mission pour l'Expertise scientifique (MPES) du CNRS. Avec la MPES, l'ambition du CNRS est d'apporter un éclairage scientifique pluridisciplinaire à la décision et au débat publics sur des sujets complexes à forts enjeux de société. Directrice de recherche en biologie cellulaire du cancer, elle dirigeait auparavant une équipe de recherche au Collège de France (INSERM-CNRS) et a reçu en 2023 le prix Mitjavile de l'Académie nationale de médecine.

Elle a également présidé l'association l'Arbre des Connaissances, qui crée des ponts entre la recherche, l'éducation et la culture, où elle a contribué à dévelop-

per le dispositif Jouer à Débattre, diffusé chaque année auprès de plus de 60 000 jeunes en France.

Violette LARRIEU est chercheuse post-doctorante en science politique à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement), membre de l'UMR AMURE (Aménagement des Usages des Ressources et des Espaces marins et littoraux, UMR 6308) et chercheuse associée au CEPEL (Centre d'Études Politiques Et sociales). Depuis 2025, elle est chargée de mission « sciences humaines et sociales » au sein de l'équipe opérationnelle du PEPR « Grands fonds marins : savoirs, usages, communs ».

Ses travaux portent sur les transformations des politiques de défense et leur privatisation (thèse soutenue à l'Université de Montpellier en 2020), sur les politiques d'innovation dans les forces armées (deux postdoctorats de 2021 à 2025 à l'ENSTA Bretagne), sur le financement du soutien militaire français à l'Ukraine (participation à l'ANR « Le nerf de la guerre » dirigée par Jean Joana) et sur les transformations des politiques publiques d'enseignement supérieur et de la recherche (PEPR Grands fonds marins).

Violette Larrieu a aussi enseigné la science politique et la sociologie dans plusieurs établissements du supérieur ces dix dernières années.



D.R.

Gonéri LE COZANNET est chercheur au BRGM (service géologique national) dans le domaine des risques côtiers et du changement climatique. Il est ingénieur de l'École nationale supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (2002) et diplômé d'un doctorat en Géographie (Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne - 2016) et d'une habilitation à diriger des

recherches en Géosciences et Environnement (ENS - PSL, 2024).

Il exerce depuis 2006 au sein de l'unité « Risques côtiers et changement climatique » de la direction des Risques et de la Prévention. Ses travaux de recherche portent sur les effets de l'élévation du niveau de la mer sur l'érosion côtière et les submersions marines. Il a notamment coordonné le projet de recherche européen CoCliCo visant à démontrer la faisabilité de la mise en place d'un service climatique pour l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer en Europe.

Il est auteur ou co-auteur d'une trentaine de rapports publics et d'une centaine de publications dans des revues à comité de lecture. Il a contribué à une expertise sur l'assurance et le changement climatique pour les ministères en charge des Finances et de l'Environnement en 2023. Il a contribué en tant qu'auteur principal aux deuxièmes volets des 6^e et 7^e rapports du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité au changement climatique ainsi qu'au rapport « Risques climatiques et environnementaux côtiers en Méditerranée » de 2024 du MedECC (Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change).

Il est membre du Haut-Conseil pour le Climat et du comité scientifique de l'Ifremer.



D.R.

Pascal LE FLOC'H est professeur d'économie à l'Université de Bretagne occidentale, chercheur au laboratoire AMURE. Ses travaux portent sur les activités de pêche, en lien avec d'autres activités telles que le tourisme et les énergies renouvelables en mer.

Il porte un intérêt particulier à l'analyse régionale et territoriale.

Il a publié deux ouvrages aux Presses Universitaires de Rennes en 2017, *Les pêches maritimes françaises* et, en 2025, *Pêche et tourisme à Saint-Pierre-et-Miquelon*.



D.R.

Christelle LE GRAND est ingénieure statisticienne, spécialisée en économie des pêches à l'Ifremer. Ses travaux portent sur la caractérisation socio-économique de la pêche professionnelle à travers des indicateurs de caractéristiques techniques, d'activité, de production, économiques, sociaux ou de durabilité.

Elle travaille à différentes échelles, de la zone couverte par un parc éolien à une écorégion (par exemple dans le Golfe de Gascogne), y compris en Outre-mer.



D.R.

Soizick F. LE GUYADER, après un diplôme de docteur en Pharmacie et une thèse de recherche à l'Université de Rennes 1, est arrivée en 1992 à l'Ifremer. Au sein du laboratoire Santé Environnement et Microbiologie, elle y a développé une activité de recherche en virologie basée sur la détection de virus pathogène pour l'homme dans l'environnement côtier. Outre le développe-

ment de méthodes pour la détection de ces virus, les principaux objectifs de ses recherches sont de comprendre comment les coquillages se contaminent dans le milieu et l'impact sur l'homme lors de leur consommation.

Avec ses collègues, elle a ainsi démontré que l'huître n'est pas juste un filtre passif, mais qu'elle est capable de sélectionner activement certaines souches de norovirus, *via* des ligands spécifiques détectés dans les tissus digestifs. Rapidement ses recherches se sont tournées vers l'analyse des eaux usées, voie d'apport majeure de la contamination en zone littorale.

Soizick F. Le Guyader est l'un des membres fondateurs d'Obepine, et du comité directeur d'Obepine+. Ses travaux actuels portent sur l'analyse du virome des eaux usées, et des coquillages en particulier ceux

impliqués dans des épidémies en collaboration avec ses collègues cliniciens.

Yacine MOUFID est issu d'une formation pluridisciplinaire en géographie et en sciences de la mer et du littoral. Après des missions d'ingénieur en gestion de données et en coordination de laboratoire à l'Ifremer, il occupe aujourd'hui le poste d'ingénieur chargé du volet « Données et échantillons » du PEPR Grands Fonds Marins.

Pierre-Yves LE MEUR est anthropologue, directeur de recherche à l'IRD et membre de l'UMR SENS (Savoirs environnements sociétés). Basé en Nouvelle-Calédonie de 2008 à 2015 et depuis 2021, il travaille dans le Pacifique Sud depuis une vingtaine d'années sur la politique des ressources (terre, mine, eau), des appartenances et des souverainetés. Ses recherches se sont étendues aux grands fonds marins, *via* le PEPR « Grands fonds marins : savoirs, usages, communs » dont il est co-pilote pour l'IRD, avec Valérie Chavagnac (CNRS) et Pierre-Marie Sarradin (Ifremer).

Il explore aussi les interfaces science-politique-société et coordonne avec Valelia Muni Toke (IRD-SeDyL) l'expertise scientifique collective sur les « Enjeux de connaissance et de gouvernance des grands fonds marins » commanditée par le ministère chargé de la Mer.

Olivier LE PIVERT est délégué à la coordination de l'Appui aux Politiques publiques (APP) à l'Ifremer. À ce titre, il coordonne l'ensemble des programmes de surveillance, de référence et d'expertise scientifique conduits par l'institut pour le compte des pouvoirs publics.

Ses activités couvrent les filières pêche et aquaculture, les énergies marines renouvelables, l'exploration des grands fonds marins, la protection et la restauration de la biodiversité marine, la surveillance des événements extrêmes, l'évaluation des impacts des déchets et des contaminants.

Pierre Yves LE TRAON est directeur scientifique de Mercator Ocean International et directeur de recherche à l'Ifremer. Il supervise la gestion du programme du service marin Copernicus de l'UE. Ses domaines d'expertise comprennent les systèmes d'observation des océans *in situ* et par satellite, la modélisation, la prévision océanique et l'océanographie opérationnelle. Il a été et est membre des comités directeurs et consultatifs de programmes internationaux liés à l'observation des océans, à la prévision des océans et à leurs applications.

Lucas LEON a une formation d'ingénieur généraliste complétée par une spécialisation en ingénierie navale. Il a travaillé chez différents acteurs du secteur maritime, société de classification, bureaux d'études et armateurs pour lesquels il a successivement endossé les casquettes d'ingénieur d'études, d'expert technique et de superintendant. Il a rejoint l'Ifremer en 2021 en tant qu'ingénieur naval au sein de la direction de la flotte océanographique.

Il est en charge du suivi de la modernisation des navires existants et de la construction des nouveaux navires de la flotte océanographique. Dans ce cadre, il est spécialisé dans l'évaluation technique des solutions visant à la décarbonation de cette flotte.



D.R.

Sophie LÉONARDI est ingénieure économiste halieute à l'Institut français de Recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), rattachée à l'UMR AMURE. Après avoir assuré, durant 8 années, la composante socio-économique du Système d'Informations Halieutiques de l'Ifremer, elle consacre désormais ses travaux à des projets de recherche interdisciplinaires portant sur les enjeux socio-économiques de la pêche professionnelle, en particulier dans le contexte du déploiement des parcs éoliens en mer et des transformations induites par le changement climatique.

Co-responsable du pôle Observation, Données et Méthodes de l'UMR AMURE, elle s'investit dans la promotion des bonnes pratiques de gestion et de valorisation des données de recherche, dans le cadre des principes de la science ouverte.



D.R.

Céline LIRET, directrice scientifique d'Océanopolis, est docteure en océnologie biologique de l'Université de Bretagne occidentale. Elle a mené des travaux de recherche sur l'écologie des populations côtières de mammifères marins, et plus particulièrement sur les grands dauphins de la mer d'Iroise en Bretagne.

Depuis 25 ans à Océanopolis, elle se consacre à l'étude de la biodiversité marine, au développement de projets multi-acteurs, et à la valorisation des savoirs.

Elle agit en faveur d'une appropriation par tous des connaissances scientifiques, dans leurs dimensions pluridisciplinaires, en renforçant l'interface Science-Société à travers différents programmes (Objectif Plancton – Recherche participative ; Océanolab – 1^{er} laboratoire de recherche ouvert au public...). Elle est active au sein de divers organismes et réseaux nationaux, européens et internationaux afin d'agir collectivement pour une préservation durable de l'océan.



D.R.

Romane LUCQ est chargée de mission sciences océaniques – politique à l'Ifremer où elle coordonne la collection de notes « AMERS ».

Elle a précédemment été assistante de rédaction au pôle Publications de l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS), notamment pour *La Revue*

internationale et stratégique, et a contribué aux travaux du programme de recherche de l'IRIS dédié à l'Océan et aux fonds marins.



D.R.

Dr Youna LBL LYONS est présidente d'ACOPS (Advisory Committee on the Protection of the Sea) à Londres, présidente d'ACOPS Comité Consultatif pour la Protection de la Mer à Brest et *senior global fellow* au CIL à la National University of Singapore.

Spécialisée dans l'étude et la recherche des différentes facettes de la gouvernance de la mer et de

ses ressources, avec un intérêt particulier pour la cohérence de la gouvernance, l'articulation des régimes sectoriels ou régionaux avec les mécanismes globaux, ainsi que la circulation et la mise en œuvre concrète des normes et concepts, par exemple l'approche écosystémique et la résilience écosystémique, le respect de l'équilibre écologique, et la prise en compte des effets cumulés. Elle se concentre également sur la réglementation internationale et régionale de questions techniques telles que le captage et le stockage du carbone, la géo-ingénierie marine, les scrubbers utilisés pour le transport maritime international et les collisions entre navires et mammifères marins.

Elle envisage ces sujets avec une double formation de droit international et d'océanographie acquise en Australie, en France et aux États-Unis, ainsi que plus de 30 années d'expérience professionnelle. Son expérience inclut plus de 10 ans en contentieux et arbitrage international au sein du Cabinet Clifford Chance et 14 ans au sein de l'Université nationale de Singapour, avec laquelle elle continue à collaborer et dont elle est toujours affiliée.

Administratrice et présidente d'ACOPS, elle participe à l'élaboration d'instruments, de mesures et de rapports adoptés par des institutions internationales (par exemple AIFM, LC/LP, OMI, BBNJ, OSPAR, Conseil de l'Arctique, GESAMP, WOA III), mais également à des comités consultatifs scientifiques de projets de recherche ou de publications.



D.R.

Tristan MACQUET est ingénieur diplômé de Centrale Lyon (2011), titulaire d'un master en sciences de l'environnement de l'Université Tsinghua à Pékin. Il a vécu 13 ans en Chine en tant que consultant, enseignant puis directeur d'établissements scolaires.

De retour en France, il devient agrégé en cultures marines au Lycée de la Mer et du Littoral de

Bourcefranc, puis cofonde Le Paysan Marin. Conférencier, contributeur à des revues spécialisées, formateur, il participe au rayonnement des nouvelles pratiques aquacoles en France.



D.R.

Christophe MAISONDIEU est chercheur en dynamique des fluides, spécialisé dans les domaines de l'hydrodynamique navale et de l'océano-météo. Ses travaux portent plus particulièrement sur la caractérisation de la ressource et de la réponse à l'environnement océanique des structures déployées en mer et plus particulièrement des systèmes EMR.

Responsable du laboratoire d'Hydrodynamique Navale de l'Ifremer, il est également le représentant français au sein du comité exécutif du Programme de collaboration technologique de l'Agence internationale de l'Énergie dédié aux énergies océaniques (IEA-OES).



D.R.

Célyla MARTIAL est ingénieure d'études en sciences halieutiques et aquacoles à l'Institut Agro Rennes-Angers. Son approche transdisciplinaire repose sur l'interface entre l'analyse de données quantitatives (socio-économiques et écologiques) et qualitatives pour éclairer des questions de gouvernance et de gestion des ressources dans le secteur de la pêche.

Elle met en œuvre des méthodes de sciences sociales afin de collecter des savoirs individuels sur les enjeux de la pêche dans des domaines variés : de la cohabitation de l'éolien en mer avec les pêcheries à l'amélioration des connaissances sur la ressource.



D.R.

Pierre MARTY est maître de conférences à l'École centrale de Nantes. Il enseigne la transition énergétique.

Spécialiste de la modélisation énergétique des navires, il anime le réseau interdisciplinaire de recherche nantaise sur la décarbonation du transport maritime.

Angélique MELET est océanographe physicienne à Mercator Ocean dans le domaine de la hausse du niveau de la mer et des projections climatiques régionales de l'océan. Ingénieure de l'École Centrale de Lyon (2006), elle est diplômée d'un doctorat en Sciences de la Terre et de l'Univers (Université Grenoble Alpes, 2010) et d'une Habilitation à Diriger des Recherches (Université de Toulouse, 2022). À Mercator Ocean, elle était responsable des développements scientifiques du service européen Copernicus Marine, où elle gérait le programme de R&D et la stratégie scientifique.

Aujourd'hui, elle dirige l'équipe « Climat de l'océan » et a contribué à plusieurs projets et initiatives européens liés à l'élévation du niveau de la mer, tels que le développement d'un système d'alerte précoce pan-eu-



D.R.

ropéen basé sur des prévisions à court terme dans le cadre du projet H2020 ECFAS, ainsi que la coordination de deux chapitres du premier rapport sur l'élévation du niveau de la mer en Europe du JPI Knowledge Hub on Sea Level Rise. Elle coordonne également l'élaboration de projections climatiques régionales de l'océan en coprésidant un groupe de travail conjoint CLIVAR-CORDEX sur cette thématique au sein du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (WCRP) et en coordonnant le projet de recherche Horizon Europe SEACLIM (European SEAS CLIMate impact prediction through regional models).

Angélique Melet compte plus de 70 publications dans des revues internationales à comité de lecture. Elle contribue en tant qu'autrice principale au 7^e rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) sur les bases scientifiques physiques de l'évolution du climat.



D.R.

Nathalie MERCIER-PERRIN, présidente du Cluster Maritime Français, l'organisation fédératrice des acteurs de l'économie maritime en France, est une dirigeante engagée sur les enjeux maritimes, environnementaux et de transformation des modèles économiques.

En portant « l'or bleu », elle propose une lecture systémique de l'océan comme capital stratégique global, articulant performance économique, préservation écologique et souveraineté. Ainsi, elle défend une vision intégrée de l'économie maritime fondée sur la responsabilité, la connaissance et le temps long, intégrant pleinement la dimension ultramarine.

Ayant à cœur de rapprocher les acteurs industriels, scientifiques et institutionnels autour d'une vision commune des enjeux maritimes contemporains, elle porte la conviction que l'or bleu constitue un levier majeur de transformation du XXI^e siècle.



D.R.

Guillaume MITTA est professeur des universités et détaché à l'Ifremer depuis 2021. Il y assure la responsabilité de l'unité Ifremer « Ressources marines en Polynésie française », il est également directeur de l'UMR « Santé et Services des Écosystèmes polynésiens » (SECOPOP) regroupant une centaine de personnels de l'Ifremer, de l'Institut Louis Malardé, de l'IRD et de l'Université de Polynésie française.

Son champ d'expertise est la recherche et le développement dans le domaine de l'aquaculture, les approches omiques et l'adaptation des espèces à leur

environnement biotique et abiotique. Il a coordonné ou co-coordonné 10 programmes de recherche financés par l'ANR. Il est l'auteur de 110 articles de rang A (H-index 47 et 5 679 citations, *Web of Science*) et a dirigé 15 thèses durant sa carrière.



D.R.

Cristián J. MONACO est biologiste marin et chercheur en éco-physiologie, spécialisé dans la prédiction des impacts du changement climatique sur les systèmes naturels et anthropisés. Membre de l'Unité Ifremer « Ressources marines en Polynésie française » pendant 6 ans, il a dirigé et participé à de nombreux projets de recherche consacrés aux principales espèces aquacoles du territoire, notamment l'huître perlière, l'huître de roche et le bénitier.

Financé par la direction des Ressources marines, il a été responsable du programme scientifique OSTREAPOL, dont l'objectif final est la mise en place d'une activité d'ostréiculture en Polynésie française. Aujourd'hui basé en Bretagne, il est associé à l'unité Ifremer « Éco-physiologie et traits d'histoire de vie des organismes marins » et à l'UMR « Laboratoire des sciences de l'environnement marin ».

Il est l'auteur de 40 articles de rang A (indice h de 16 et 910 citations, *Web of Science*).

Alexis MOUCHE est docteur en télédétection appliquée à l'observation de l'océan, au sein de l'équipe Satellite et Interface Air-Mer du Laboratoire d'Océanographie physique et spatiale. Ses travaux de recherche sont actuellement soutenus par l'Agence spatiale européenne (ESA) et le programme européen Copernicus.

Il est également impliqué dans les études de nouvelles missions européennes d'observation des océans, et la définition de démonstrations de Jumeaux numériques.



D.R.

Hervé MOULINIER est ingénieur en électronique et docteur en acoustique. Il a eu une carrière technique et industrielle chez Thales notamment comme directeur d'établissement et directeur technique en charge de la Prospective et de la Stratégie technique de la division des Systèmes de Mission de Défense de Thales avant sa retraite en 2015.

Il a été administrateur de plusieurs institutions d'enseignement supérieur et d'organisations professionnelles, et membre du Conseil économique et social de Bretagne. Il a été président du pôle de compétitivité MER Bretagne Atlantique 8 ans et son vice-président 4 ans.

Impliqué dans de nombreuses institutions maritimes nationales, il a été personnalité qualifiée du Conseil national de la Mer et des Littoraux, membre du bureau du COMER, des CA du SHOM, de France Énergies

Marines, et président de l'École Nationale Supérieure Maritime de décembre 2012 à mars 2019.

Maëlle NEXER est spécialiste des interactions entre les énergies marines renouvelables et la biodiversité. Après un doctorat en géomorphologie littorale, elle a exercé comme attachée temporaire d'enseignement et de recherche avant de rejoindre France Énergies Marines. Pendant 7 ans, elle y a animé des groupes d'experts et piloté des projets majeurs (COME3T, DUNES, MODULES) consacrés aux impacts environnementaux des énergies marines renouvelables.

Depuis 2025, elle assure la coordination nationale de l'Observatoire de l'Éolien en mer à l'Office français de la Biodiversité, où elle contribue à structurer la connaissance nationale sur la biodiversité dans le contexte du développement de l'éolien en mer.



D.R.

Nathalie NIQUIL est directrice de recherche au CNRS en Écologie marine numérique. Elle a participé à la création du laboratoire LIENSs à l'Université de la Rochelle avant de rejoindre les laboratoires BOREA puis M2C à l'Université de Caen. Elle a présidé le conseil scientifique de l'Estuaire de la Seine.

Elle est spécialiste de la modélisation des réseaux trophiques et socio-écologiques marins. Elle s'intéresse aux impacts cumulés sur les écosystèmes marins (changement climatique, énergie marine...) et au développement de méthodes numériques pour modéliser leurs effets sur le fonctionnement de l'écosystème et quantifier l'incertitude associée. Depuis 2023, elle copilote l'ESCO sur les effets des éoliennes en mer sur la biodiversité marine et les socio-écosystèmes marins et côtiers.

Joanna OLLIVIER est chercheuse en virologie au laboratoire Santé, Environnement et Microbiologie (LSEM) de l'unité MASAE de l'Ifremer depuis 2006. Elle a réalisé sa thèse sur la diversité génétique des souches de *Borrelia burgdorferi* circulant en Pologne, soutenue à l'Institut vétérinaire national – Institut national de recherche de Puławy (Pologne).

Elle rejoint ensuite l'Ifremer pour un post-doctorat consacré à la diversité génétique des norovirus dans les huîtres impliquées dans des épidémies de gastro-entérite aiguë. Recrutée en 2007, elle développe des travaux portant sur l'optimisation de méthodes d'identification et la compréhension des voies de transfert de la contamination virale d'origine anthropique vers les zones côtières.

Ses recherches visent à proposer des solutions de prévention et de biosécurisation pour les productions conchylicoles. Depuis le 1^{er} janvier 2026, elle assure le rôle de responsable du laboratoire SEM.

Jan OPDERBECKE a intégré l'Ifremer en 1994 après un doctorat en traitement de signal à l'ENS de Cachan.

Il s'est spécialisé en robotique sous-marine et dans les technologies pour l'exploration des grands fonds marins. Il est aujourd'hui directeur adjoint de la Flotte Océanographique Française, en charge des projets et de l'innovation.



D.R.

Ika PAUL-PONT est directrice de recherche au CNRS au sein du LEMAR (Laboratoire des sciences de l'environnement marin). Spécialisée en écotoxicologie, elle s'intéresse aux effets des stress multiples sur les écosystèmes marins côtiers, et notamment aux interactions entre maladies et pollution.

Elle développe depuis une dizaine d'années des projets de recherche qui portent sur le devenir des micro-déchets plastiques à l'interface terre-mer, leur rôle dans le transfert d'espèces pathogènes et nuisibles, ainsi que l'évaluation de leurs effets sur les organismes marins et la compréhension des mécanismes sous-jacents à leur toxicité.

Ces informations sont essentielles pour encourager les décideurs à mettre en œuvre des actions concrètes visant à réduire la pollution plastique.



D.R.

Pierre PETITGAS est océanographe et écologue halieute, avec un doctorat en Géostatistique. Son domaine de recherche porte sur l'organisation géographique des populations de poissons marins, ses liens avec l'environnement et la pêche. Il a coordonné des programmes de recherche sur la variabilité des ressources halieutiques et développé des méthodes pour les cartographier à différentes échelles.

Il a contribué à développer l'observation intégrée en mer et la modélisation couplée biologie-physique pour une compréhension du fonctionnement des écosystèmes régionaux, comme le golfe de Gascogne. Il promeut une approche spatialisée de la gestion des pêches, intégrant l'effort et les pratiques de pêche en fonction des habitats, dans le contexte du changement climatique et de la conservation de la biodiversité.

Il commence sa carrière à l'Institut de Recherche pour le développement (IRD). Il y acquiert une expérience sur les écosystèmes tropicaux et leurs ressources halieutiques. Depuis plus de 20 ans à l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (Ifremer), il est aujourd'hui directeur adjoint du département Ressources biologiques et environnement.

Il représente la France au Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM), une organisation internationale pour la coopération scientifique, qui fournit à ses États membres et à la Commission européenne, des avis sur l'exploitation des ressources halieutiques et le bon état des écosystèmes marins.



D.R.

Geneviève PONS était en charge de l'environnement et du climat dans le cabinet de Jacques Delors durant ses derniers mandats de président de la Commission européenne (CE) (1991-1995). Elle est directrice honoraire de la CE où elle a occupé plusieurs postes de management avant de devenir directrice du service juridique de l'OIT en 2013 puis directrice du bureau européen du WWF en 2015.

Depuis novembre 2017, elle dirige Europe Jacques Delors, le dernier-né de la famille de *think tanks* portant la vision européenne de Jacques Delors. Elle est diplômée de Sciences Po Paris, de la Sorbonne et de l'ENA. Elle est considérée par POLITICO comme l'une des femmes les plus influentes à Bruxelles. Elle préside le groupe d'engagement citoyen de la mission européenne : Restore our Ocean and Waters.

Elle co-préside, avec Pascal Lamy, la coalition Antarctica2030, qui vise à protéger de vastes zones marines autour de l'Antarctique. Elle est également coprésidente avec Sébastien Treyer (IDDRI) du Comité des parties prenantes de l'Ifremer et membre du groupe Océan de la Fondation Afrique Europe.

Geneviève Pons est chevalier de la Légion d'honneur.



D.R.

Tristan RENAULT, spécialiste de la santé des espèces aquatiques, est docteur vétérinaire, titulaire d'un DEA d'immunologie approfondie et d'une habilitation à diriger des recherches (HDR). Recruté à l'Ifremer en 1992, il développe depuis plus de 30 ans des travaux de recherche et possède une expertise reconnue dans le domaine de la santé

des espèces marines et de leurs écosystèmes.

Ses travaux ont été menés tant au plan national que dans le cadre de coopérations européennes et internationales avec, en particulier, la coordination de plusieurs projets financés par la Commission européenne. Spécialiste en médecine vétérinaire, microbiologie, virologie, immunologie et écotoxicologie, il a dirigé différentes structures de recherche au sein de l'Ifremer (laboratoires, unités et départements). Il a été ainsi directeur du département Ressources biologiques et environnement, ces dix dernières années, de 2015 à 2025.

Tristan Renault est auteur ou co-auteur de plus de 160 publications dans des revues à comité de lecture et a encadré plus de 25 doctorantes et doctorants.

Wilfried SANCHEZ est docteur du Muséum national d'Histoire naturelle en écotoxicologie. Après avoir mené des activités à la frontière entre recherche et appui aux pouvoirs publics sur les impacts des polluants



D.R.

chimiques sur les écosystèmes aquatiques, il a intégré l'Ifremer en 2018.

D'abord directeur scientifique adjoint, il coordonne désormais les activités relatives à l'océan sain et nourricier. Passionné par les interactions entre art et science, il est notamment l'auteur du livre *Chercheurs en mission* publié aux Éditions QUAE.

Pierre-Marie SARRADIN est chercheur à l'Ifremer depuis 1994. Chimiste de l'environnement, il a travaillé sur le fonctionnement des écosystèmes hydrothermaux. Il a été directeur de l'Unité Mixte de Recherche BEEP (Biologie et Écologie des écosystèmes marins profonds) entre 2009 et 2024. Il a piloté l'observatoire fond de mer EMSO Açores déployé sur le champ hydrothermal Lucky Strike jusqu'en 2024. Il est depuis coordinateur du thème prioritaire de l'Ifremer « Connaître l'océan profond » et est l'un des trois co-pilotes du PEPR Grands Fonds Marins.

Il est également membre du conseil scientifique international de la TGIR Flotte océanographique française et du conseil scientifique français pour la mise en place de l'accord international BBNJ. Il s'implique régulièrement dans des actions de communication grand public, de médiation scientifique (Mon lopin de mer...) et des projets Art et Science.

Pierre SÉRODES est directeur du département Infrastructures de recherche et Systèmes d'information à l'Ifremer, en charge des infrastructures numériques, des systèmes d'information et de la gestion des données marines pour le compte de l'institut et dans le cadre des programmes nationaux et internationaux de partage des données marines. Le département opère également Datarmor, le supercalculateur français dédié aux données scientifiques sur l'Océan.



D.R.

Maximilien SIMON est titulaire d'un doctorat en écologie marine et Ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts. De 2013 à 2018, il a occupé des postes en administration centrale à la direction des Pêches maritimes et de l'Aquaculture en tant qu'expert du suivi des ressources halieutiques et chef du bureau de l'appui scientifique et des données. Il a rejoint

l'Ifremer en 2018 en tant que conseiller auprès de la direction générale. Il est désormais adjoint au directeur de la flotte océanographique.

Après avoir coordonné la rédaction du livre blanc « À quoi ressemblera demain la Flotte océanographique française », il est plus particulièrement chargé du renouvellement et de la décarbonation de cette flotte, infrastructure de recherche à capacité mondiale et

ouverte à l'ensemble de la communauté scientifique nationale.



D.R.

Christophe SIRUGUE, après des études à la Faculté d'Histoire de Dijon, assume plusieurs mandats politiques comme président du conseil général de Saône et Loire (2004–2008), député et vice-président de l'Assemblée nationale (2007–2016), maire de Chalon-sur-Saône et président de la communauté d'agglomération du Grand Chalon (2008–2014).

Il est nommé Secrétaire d'État à l'Industrie et à l'Innovation en septembre 2016, fonction qu'il cumule avec celle de Secrétaire d'État au Numérique à partir de février 2017. En 2017 il devient directeur associé du cabinet de conseil aux dirigeants d'entreprises Tilder situé à Paris.

Depuis décembre 2020, il est directeur général de la SAEM Nausicaá – Centre national de la Mer, située à Boulogne-sur-Mer (62). Il est également depuis janvier 2026, directeur général de la SEM HALIOTECH qui gère la station aquacole expérimentale de Wimereux (62). Il est aussi depuis janvier 2026, directeur de la SAS Nautilaá, structure d'exploitation d'un navire à passagers.



D.R.

Jérôme SPITZ est chargé de recherche au sein de l'équipe « Écologie et conservation des prédateurs marins » du Centre national de la recherche scientifique (CNRS). Ses travaux de recherche ont toujours été centrés sur le rôle des prédateurs supérieurs dans les réseaux trophiques au sein des écosystèmes marins. Ses axes de recherche

et les approches développées ont évolué au cours du temps progressant d'une approche descriptive des régimes alimentaires vers une compréhension des relations fonctionnelles entre proies et prédateurs afin d'étudier la dynamique des écosystèmes marins dans un contexte d'interactions avec l'Homme. Ainsi, il a, au cours du temps, associé des approches à différentes échelles, du gène à l'écosystème, et le plus souvent dans une perspective de conservation de la biodiversité et de développement durable des environnements marins.

Ses problématiques actuelles de recherche se focalisent en particulier sur l'évaluation des risques et des conséquences des effets des pressions anthropiques, et plus largement, de l'érosion de la biodiversité marine sur le bon état écologique des prédateurs marins et sur la pérennité des services écosystémiques associés. À l'interface entre la science et les politiques publiques de conservation, il appuie également le ministère en charge de l'Environnement et l'Office français de la Biodiversité sur les questions liées aux mammifères marins.

Il a dirigé, en 2010, une thèse doctorale en écologie à l'Université de La Rochelle.



D.R.

Olivier THÉBAUD est économiste des ressources naturelles et de l'environnement. Ses travaux portent sur la mobilisation des concepts, méthodes et outils de l'analyse économique, en lien avec les connaissances issues d'autres disciplines des sciences de la mer, pour éclairer les choix collectifs en matière de gouvernance des usages des ressources marines et littorales.

Il rejoint l'Ifremer en 1998, où il participe à la fondation de l'UMR AMURE, aujourd'hui l'un des plus grands groupes européens de recherche en sciences humaines et sociales appliquées à l'océan, dont il a assuré la direction de 2013 à 2021.



D.R.

Rémi THIÉBLEMONT est chercheur au BRGM (service Géologique National) au sein de l'unité Risques côtiers et Changement climatique depuis 2019. Après avoir obtenu son doctorat dans le domaine de la physique de l'atmosphère à l'Université d'Orléans en 2012, il a poursuivi ses activités de recherche en post-doctorat en Allemagne

(GEOMAR) et en France (CNRS), développant son expertise sur les méthodes et outils permettant de comprendre et de quantifier la variabilité climatique et le changement climatique.

Aujourd'hui ses recherches portent sur la compréhension et la quantification des variations du niveau de la mer, ainsi que sur la manière dont ces évolutions influencent les aléas et les risques côtiers. Il a été impliqué dans plusieurs projets de recherche dans le domaine de l'élévation du niveau de la mer et des sciences côtières (ERA4CS-ECLISEA, H2020-PROTECT, H2020-CoCliCo), et travaille actuellement dans le cadre de projets qui visent à améliorer la prévision des aléas côtiers à des échelles saisonnières à décennales (HE Seaclim, IRICOT).

Depuis 2025, il coordonne le projet transdisciplinaire CERISE qui a pour objectif d'améliorer la communication des incertitudes pour mieux s'adapter à l'élévation du niveau de la mer. Il participe également au co-développement de services climatiques, d'outils numériques et de jeux de données.

Rémi Thiéblemont est impliqué dans des projets en appui aux politiques publiques (par exemple pour le ministère français de l'Environnement), en apportant son expertise sur les projections d'élévation du niveau de la mer et leurs impacts, et est régulièrement sollicité par les acteurs du littoral français (industrie, collectivités territoriales, praticiens du littoral).



D.R.

Sébastien TREYER est directeur général de l'Institut du Développement durable et des Relations internationales (Iddri) depuis janvier 2019 (il avait rejoint l'institut en 2010 en tant que directeur des programmes), également président du comité scientifique et technique du Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM) et membre de la Lead Faculty du réseau Earth System Governance.

Ancien élève de l'École polytechnique, Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts, et docteur en Gestion de l'environnement, il a été chargé de la prospective au ministère français de l'Environnement, et a notamment coordonné l'exercice de prospective Agrimonde (*Comment nourrir la planète en 2050 ?*). Il a joué un rôle actif d'animation de l'interface entre science et politique et de programmation scientifique auprès de la Commission européenne, de l'Agence nationale de la Recherche, ou d'acteurs territoriaux comme l'Agence de l'Eau Seine Normandie.



D.R.

Clara ULRICH est ingénieure et chercheuse halieute. Depuis 2023, elle est coordinatrice des expertises scientifiques sur les questions halieutiques (pêche) à l'Ifremer, aux interfaces avec les services de l'État et de l'Union européenne, avec le monde professionnel de la pêche et avec la société civile au sens large.

Auparavant, elle a effectué 20 ans de recherche à l'Université Technique du Danemark, à Copenhague, et a été nommée professeure en 2015, avec des recherches axées sur la Politique Commune de la Pêche, les pêcheries mixtes et les captures accessoires ; puis elle a été directrice scientifique adjointe à Ifremer entre 2019 et 2023.

Elle est également membre du Comité Scientifique, Technique et Économique pour la Pêche auprès de la Commission européenne depuis 2012, et présidente de ce comité entre 2016 et 2022.



D.R.

Simon Van WYNSBERGE est écologue spécialisé dans la dynamique des populations des espèces marines tropicales. Employé à l'Ifremer depuis 2018, il a travaillé sur différents projets liés aux efflorescences d'algues et à la gestion de la pêche en Nouvelle-Calédonie, puis a intégré l'unité Ifremer « Ressources marines en Polynésie française » en 2024.

Il coordonne actuellement le projet GAIA (<https://anr.fr/Projet-ANR-21-CE32-0011>) qui vise à évaluer l'efficacité de différentes stratégies de gestion pour une

espèce exploitée, impactée par les canicules marines. Il est l'auteur de 41 articles de rang A.



D.R.

Diane VASCHALDE travaille aux interfaces entre sciences océaniques et action publique dans le domaine marin. À l'Ifremer, elle contribue à la valorisation des résultats de la recherche dans une perspective d'appui aux politiques publiques et anime le comité des parties prenantes de l'institut.

Elle a précédemment coordonné au niveau national, pour l'Office français de la Biodiversité, la mise en œuvre opérationnelle du volet « Analyses économiques et sociales » de la directive-cadre Stratégie pour le milieu marin, et facilité le recours aux sciences humaines et sociales en appui à la gestion dans les aires marines protégées.

Diane Vaschalde est diplômée de Sciences Po Paris en relations internationales et politiques environnementales.



D.R.

Huixin WU est doctorante en double diplôme en économie marine et halieutique dans le cadre du programme doctoral AUFRANDE, affiliée conjointement à l'Université de Bretagne occidentale (France), à l'Ifremer (France) et à l'Université de Tasmanie (Australie).

Ses recherches doctorales portent sur les impacts socio-économiques cumulés du développement des parcs éoliens en mer sur les pêcheries commerciales, avec un accent particulier sur le déplacement de l'effort de pêche, la congestion spatiale et les réponses d'adaptation des acteurs.