

30 QUESTIONS SUR L'OCÉAN

SORBONNE

essais

Collection dirigée par

Olivier Forcade & Danielle Seilhean

Fixer l'actualité de nos vies dans le regard de la science, saisir la nouveauté des débats de société par une approche croisée de toutes les sciences, s'emparer des réflexions et des projections sur l'avenir : la collection « Les essais de la Sorbonne » veut décrypter les mondes de demain par une analyse scientifique attentive à tous les publics. Elle embrasse les questions qui se posent à la Cité aujourd'hui et demain.

Christophe Prazuck (dir.)

30 questions sur l'océan

SORBONNE UNIVERSITÉ PRESSES
Paris

Ouvrage publié avec le concours de la faculté des Lettres
de Sorbonne Université.

Les SUP sont un service général de la faculté des Lettres
de Sorbonne Université.

© Sorbonne Université Presses, 2022
ISBN édition papier : 979-10-231-0734-0

Maquette et mise en page, Emmanuel Marc Dubois/3d2s

Le caractère Faune utilisé dans ce livre a été créé par Alice Savoie
dans le cadre d'une commande du Centre national des Arts plastiques
en partenariat avec le Groupe Imprimerie nationale.

SUP
Maison de la Recherche
Sorbonne Université
28, rue Serpente
75006 Paris

tél. : (33) 01 53 10 57 60

sup@sorbonne-universite.fr

<https://sup.sorbonne-universite.fr>

Introduction

Christophe Prazuck

Directeur de l'Institut de l'Océan de l'Alliance Sorbonne Université

En février 2022, le *One Ocean Summit* s'est tenu Brest. De nombreux chefs d'État s'y sont retrouvés pour discuter de la santé de l'océan, de son exploration, de son économie, de ses promesses, des menaces qui pèsent sur son évolution, de sa préservation, de sa gouvernance.

À cette occasion, Vincent Groizeleau qui dirige le site d'actualité maritime *Mer et Marine* a sollicité l'institut de l'Océan de l'Alliance Sorbonne Université pour peindre l'océan tel que les scientifiques de l'Alliance le voient. Or l'océan a cent faces. Trente ont été choisies pour des portraits « en miniature ».

En effet, la contrainte de chacun des portraits était le format réduit d'un article de presse. Didactique, aisé à lire et relire, mais délicat à rédiger pour des chercheurs passionnément dédiés à leurs sujets, à leurs détails, leurs hypothèses et leurs nuances.

Ce sont ces trente portraits qui sont rassemblés dans ce recueil. Ils n'épuisent pas le sujet océanique. Ils n'épuisent même pas chacun des sujets qu'ils présentent. Mais ils balayent les grandes questions océaniques du moment et procurent des références scientifiques solides sur chacun d'entre eux.

Que ces articles voguent vers les lecteurs de ce recueil, étudiants, professeurs et citoyens avertis pour susciter ou entretenir leur émerveillement pour cet océan si central pour notre planète, le vivant et nos sociétés.

Première partie

Circulation & observations de l'océan

1 Qu'est-ce que la circulation océanique ? Une mécanique aussi gigantesque ● que délicate

Éric Guilyardi

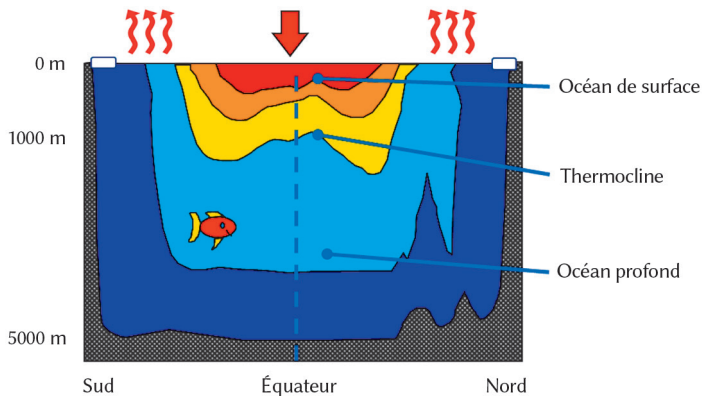
directeur de recherche CNRS | laboratoire d'Océanographie et du Climat LOCEAN/IPSL (Sorbonne Université, Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, IRD) | université de Reading, Grande Bretagne | président de l'Office for Climate Education OCE

Acteur majeur des variations lentes du climat, l'océan subit aussi les impacts du changement climatique. Plongeons dans une mécanique aussi gigantesque que délicate.

L'OCÉAN, GARDIEN DES ÉQUILIBRES

Quelle idée d'avoir appelé notre planète Terre alors qu'elle aurait dû se nommer Mer ! Terriens par essence, notre expérience de l'océan n'est souvent qu'un effleurement de sa surface. Les milliers de mètres de ses abysses nous échappent et il faut les moyens modernes de l'océanographie pour les sonder.

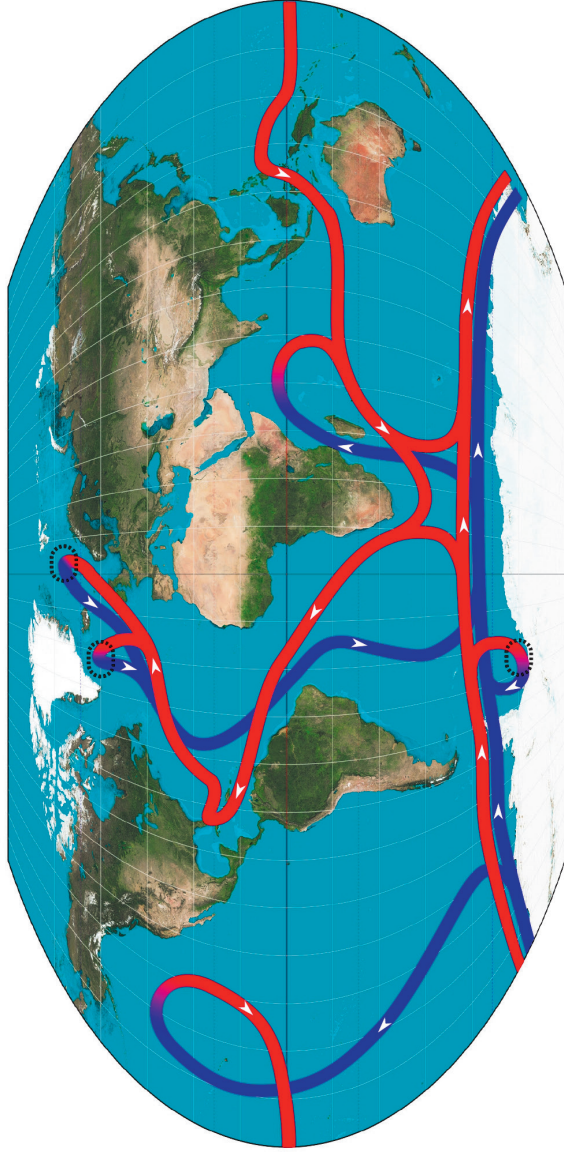
Nous savons aujourd'hui que l'océan est formé de plusieurs zones qui se distinguent par les mécanismes qui les régissent (fig. 1). Il y a d'abord l'océan de surface qui est le réceptacle des échanges avec l'atmosphère : les vents entraînent les courants, les flux de chaleur modifient la température des eaux de surface et le bilan des précipitations et de l'évaporation en modifie la salinité. Tout le monde le sait : l'océan est salé. Mais cette propriété a un



1. Les domaines de l'océan sur la verticale :

- l'*océan de surface*, réceptacle des échanges avec l'atmosphère et la glace de mer et lieu de formation des masses d'eau
- la *thermocline*, zone de changement rapide de la température
- et l'*océan profond*, alimenté par les zones polaires et dont la température moyenne est de quelques degrés

rôle fondamental car, tout comme sa température, elle affecte la densité de l'eau de mer. Les *masses d'eau* ainsi formées par les échanges en surface entre l'air et la mer sont d'abord entraînées par la circulation due au vent. Sous l'effet de leur densité, lorsque l'évaporation augmente leur salinité, ou lorsque que le contact avec un air froid fait baisser leur température, elles se mélangent avec les eaux profondes. Ce *mécanisme de plongée* des eaux en raison de leur densité plus élevée entraîne une circulation de l'océan à l'échelle globale : c'est la *circulation thermohaline* (du grec *thermos*, θερμός, température, et *halin*, ἅλς, sel, **fig. 2**). Les eaux chaudes se transforment en eaux froides dans les zones de convection près des pôles (cercles pointillés). Ces zones sont très petites par rapport au volume formé et on les appelle aussi les « ouïes » de l'océan car elles le ventilent en lui apportant des eaux froides, salées et riches



2. Vue schématique de la circulation thermohaline des océans

La branche chaude (rouge) est en surface et la branche froide (bleue) est en profondeur et représente 80 % du volume des océans. Les eaux chaudes se transforment en eaux froides dans les zones de convection près des pôles (cercles pointillés). Ces zones sont très petites par rapport au volume formé et on les appelle aussi les « ouïes » de l'océan.

en oxygène. Les eaux de surface, en particulier dans les tropiques, sont réchauffées par le rayonnement solaire. Elles se mélangent difficilement avec les eaux froides, profondes. Il existe ainsi entre ces masses d'eau chaudes et froides une zone de transition rapide : la thermocline.

LA MACHINE CLIMATIQUE & LE RÔLE DES OCÉANS

Les tropiques reçoivent plus de chaleur que les plus hautes latitudes. Pour avoir un système stable, il faut transporter cet excès de chaleur vers les pôles. Ce rôle est assuré par les deux enveloppes fluides de la planète que sont l'atmosphère et l'océan. Ensemble, ils transportent jusqu'à 5 TW (soit l'équivalent de cinq fois la production annuelle d'électricité des États-Unis d'Amérique) de l'équateur vers les pôles. L'océan est le principal contributeur dans les tropiques et subtropiques, et l'atmosphère prend le relais aux moyennes et hautes latitudes. Ce transport équilibre les variations de chaleur dues aux différences d'exposition au rayonnement du soleil, et explique l'uniformité relative de la température à la surface de la Terre. Il fait certes plus chaud à Tahiti qu'au Spitzberg, mais ce contraste entre l'équateur et les zones polaires serait décuplé sans enveloppe fluide.

Si l'océan et l'atmosphère travaillent de concert, ils n'ont pourtant pas les mêmes propriétés climatiques. L'océan a une forte inertie thermique : ses deux à trois premiers mètres contiennent autant de chaleur que l'ensemble de la colonne atmosphérique qui le surplombe (soit environ 70 km). Profond de 4000 m en moyenne, son inertie thermique est donc gigantesque, et en fait le véritable réservoir de chaleur de la machine climatique. De plus, l'essentiel de ce réservoir de chaleur est isolé de l'atmosphère.

L'océan est opaque – le flux solaire ne pénètre que de quelques dizaines de mètres – et chauffé par le haut, ce qui a tendance à le stabiliser – l'eau chaude restant, comme on vient de le voir, au-dessus de l'eau froide. L'océan est donc fortement stratifié, ce qui réduit d'autant les échanges entre l'océan profond et la surface. La différence d'inertie entre l'océan et l'atmosphère fait qu'une dépression atmosphérique a une durée de vie de quelques semaines alors que l'on peut suivre des tourbillons océaniques à la surface de l'eau pendant plusieurs années, et que les multiples chemins de la circulation profonde (voir la **fig. 2**) se parcourent en plusieurs centaines à milliers d'années.

Le rôle de l'océan et de ses masses d'eau dans le climat est donc double. D'abord, il régule les mouvements rapides de l'atmosphère, les *lissant* dans le temps et dans l'espace. Ensuite en les absorbant, en les transportant, en les transformant et en les restituant à l'atmosphère loin et longtemps après, il joue un rôle majeur dans les variations lentes du climat. Ainsi, la chaleur stockée en été dans l'océan de surface est restituée à l'atmosphère en hiver, ce qui explique par exemple la douceur hivernale du climat océanique de la Bretagne comparé à celui, plus continental, de l'Alsace.

UN ACTEUR DES VARIATIONS LENTE DU CLIMAT

Il existe de nombreuses manifestations du rôle de l'océan dans les variations lentes du climat. Tous les trois à sept ans, le phénomène *El Niño*, qui trouve son origine dans l'océan Pacifique tropical, perturbe les régimes de précipitations et la survenue des cyclones tropicaux sur toute la planète. À l'échelle décennale, la circulation océanique connaît des soubresauts qui laissent aussi leurs marques

sur le climat planétaire. Nous savons ainsi que les sécheresses au Sahel des années 1970-1980 ont été associées à des températures de surface de la mer plus élevées dans l'océan Atlantique Nord. Les enregistrements des sédiments marins, récoltés au fond des océans, montrent même que, pendant le dernier maximum glaciaire, il y a 20 000 ans, la plongée des eaux profondes dans le nord de l'Atlantique s'est fortement réduite à plusieurs reprises, limitant en quelques dizaines d'années l'extension méridienne du *Gulf Stream* et entraînant un refroidissement intense en Europe. Enfin, à l'échelle millénaire, l'océan participe à la dynamique des cycles glaciaires/interglaciaires en stockant puis en relâchant du CO₂ dans et depuis l'océan profond.

L'OCÉAN ET LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

L'océan permet de limiter le réchauffement de notre atmosphère. L'inertie de l'océan lui permet d'absorber 90% de la chaleur additionnelle due à l'accumulation des gaz à effet de serre d'origine humaine. Le cycle du carbone de l'océan permet aussi d'absorber près de 30% du CO₂ que les activités humaines émettent dans l'atmosphère. Le rôle de puits salubre s'accompagne néanmoins de conséquences sur l'océan : montée du niveau de la mer, acidification, et autres impacts sur la vie marine.

*

L'océan est une machine dont nous commençons juste à comprendre la complexité physique, chimique, biologique. Mais malgré son immensité, sa formidable inertie et ses eaux profondes millénaires, c'est une machine fragile. En moins de deux générations, l'empreinte de l'homme a atteint la démesure de ses vastes bassins et se fait sentir dans chacun de ses recoins. Les scientifiques ont

montré que notre capacité à comprendre et à anticiper l'évolution du climat terrestre dépendait de notre connaissance fine des océans et leur effet sur le climat. Citoyens par nature continentaux, il nous faut apprendre à gérer cette formidable ressource en bon père de famille planétaire. L'éducation à l'océan en forme une porte d'entrée majeure.

2. Quels sont les littoraux menacés par l'élévation du niveau de la mer ?

Denis Mercier

*professeur des universités en Géographie | faculté de Lettres
de Sorbonne Université | laboratoire de Géographie Physique :
environnements quaternaires et actuels*

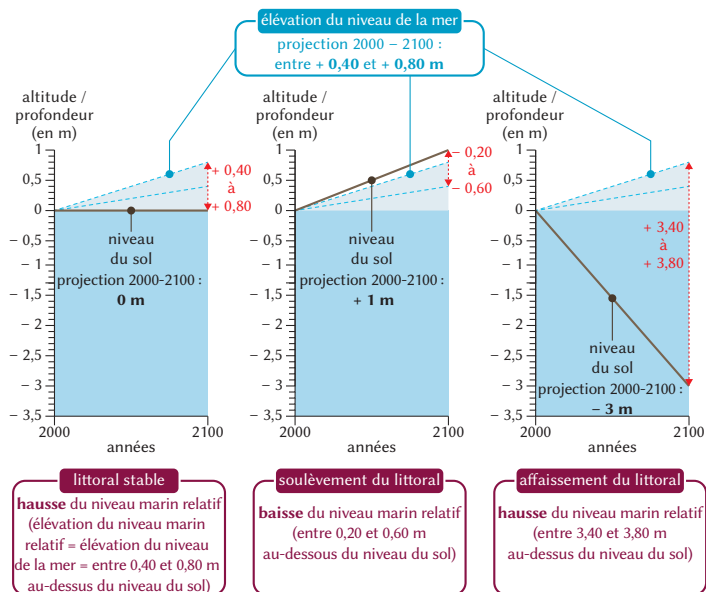
Les littoraux représentent par définition des interfaces où se rencontrent l'océan, l'atmosphère et la terre. À l'échelle mondiale, ils concentrent des enjeux stratégiques, des infrastructures et des habitants de plus en plus nombreux attirés par les aménités de ces espaces souvent magnifiques. Les grandes tendances de notre monde contemporain, la globalisation de l'économie marchande et la maritimisation des échanges accentuent la littoralisation des activités. Parallèlement, ces espaces côtiers sont confrontés aux grands changements contemporains incarnés par l'élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique et à la fonte de la cryosphère* terrestre notamment dans les milieux polaires arctiques. La présence accrue des enjeux sur ces espaces littoraux confrontés à l'augmentation de l'intensité des aléas météo-marins (tempêtes, cyclones tropicaux) induit un accroissement des risques côtiers et de la vulnérabilité des sociétés littorales, même si la gestion des risques (prévention, prédiction, prévision) s'améliore afin de tenter de rendre moins douloureuses les catastrophes à venir et plus résilientes les communautés côtières. Cependant, la géographie nous apprend à nuancer ces tendances lourdes et

inéluctables. En effet, si des littoraux sont et deviennent encore plus exposés aux risques côtiers comme ceux du pourtour du golfe du Bengale, d'autres seront épargnés par ces dynamiques, comme les littoraux des pays scandinaves.

À l'échelle mondiale, l'élévation du niveau de la mer est de 20 cm depuis le début du xx^e siècle. Le GIEC l'estime à 40 à 80 cm d'ici à 2100. Cette élévation du niveau de la mer (eustatisme positif) s'explique par l'apport d'eau douce en provenance des continents, par la fonte des glaciers de montagne et des vastes inlandsis du Groenland et de l'Antarctique et par l'élévation de la température de surface des eaux océaniques. Entre 1961 et 2016, la fonte des glaciers a été estimée à 9 000 milliards de tonnes augmentant le niveau des océans de 27 mm. Cette élévation du niveau de la mer s'inscrit dans le cadre du réchauffement climatique contemporain et se prolongera encore bien au-delà du siècle en cours avec une élévation de l'ordre de 5 m d'ici à 2300.

Les conséquences de cette élévation du niveau de la mer sur les littoraux dépendront de deux choses : le comportement de la croûte continentale (l'équilibre isostatique) et le type de littoral. On peut ainsi définir un niveau marin relatif qui prend en compte l'élévation du niveau de la mer d'un côté et les variations du niveau du sol de l'autre. Ainsi, en prenant en compte une élévation du niveau de la mer de + 40 à + 80 cm d'ici à 2100, trois cas de figure se présentent sur les littoraux du monde en fonction de la dynamique isostatique (fig. 1).

- Le premier cas de figure se rencontre par exemple sur les littoraux de France métropolitaine, où le continent est considéré comme stable (isostasie = 0). L'élévation du niveau marin relatif sera alors identique à l'élévation du niveau de la mer (eustatisme positif), de + 40 à + 80 cm d'ici à 2100.



1. Évolution du niveau marin relatif entre 2000 et 2100

- Le deuxième cas de figure se rencontre dans les régions septentrionales de la planète comme en Scandinavie, où le rebond postglaciaire, actif depuis environ 10 000 ans, est encore de l'ordre de + 1 cm par an, soit 1 m par siècle, sur les littoraux du golfe de Botnie par exemple. Ainsi, avec la même élévation eustatique de + 40 à + 80 cm, le niveau marin relatif sera inférieur en 2100 de 60 à 20 cm à ce qu'il est aujourd'hui. Ces littoraux de Scandinavie ne connaîtront donc pas de risque de submersion marine avant des décennies. Il en est de même des régions tectoniquement actives liées à la subduction des plaques océaniques sous les plaques continentales comme les littoraux du pourtour de l'océan Pacifique.

- Le troisième cas de figure est celui des littoraux dits subsidents, c'est-à-dire qui s'affaissent. C'est le cas de tous les deltas du monde, qui connaissent une compaction naturelle des sédiments apportés par les fleuves. Les littoraux densément urbanisés dont les infrastructures pèsent sur la croûte terrestre et où les densités élevées de la population induisent des pompages importants des nappes phréatiques enregistrent également une subsidence qui peut aller jusqu'à 3 cm par an, soit 3 m par siècle, à Bangkok par exemple. Dès lors, le niveau marin relatif sera de l'ordre de + 3,40 m à + 3,80 m d'ici 2100. Ces littoraux subsidents seront par conséquent les plus impactés par des inondations face à cet accroissement du niveau marin exacerbé par la subsidence naturelle et/ou artificielle des parties terrestres.

En projetant ces trois évolutions du niveau marin relatif sur les types de littoraux, nous nous retrouvons à l'échelle mondiale avec une mosaïque de cas de figure.

Les littoraux les plus vulnérables des régions stables seront les marais maritimes et les espaces poldérisés par les sociétés depuis des siècles, au départ pour l'agriculture comme les marais maritimes du littoral atlantique de l'Europe occidentale, puis pour l'industrialisation et les infrastructures portuaires comme dans les régions estuariennes de la basse Seine et de la basse Loire.

Dans les régions deltaïques de l'Asie du Sud-Est, comme le vaste delta du Gange-Brahmapoutre-Meghna (environ 150 000 km²), tous les indicateurs sont défavorables : subsidence jusqu'à 7 mm par an, parmi les plus fortes densités de population au monde, jusqu'à 1 000 ha/km², réchauffement de l'océan de surface, violence des cyclones (en 1970, le cyclone Bhola aurait entraîné la mort d'environ 300 000 personnes). Les sociétés littorales, surtout les plus pauvres comme sur les rivages du golfe du Bengale, seront donc encore plus menacées par les assauts de la mer (**fig. 2**).

Changement climatique

- élévation du niveau de la mer
 - apport d'eau douce des continents
 - fonte des glaciers
 - augmentation de la température de surface des océans
- intensification des événements météo-marins extrêmes
 - cyclones tropicaux
 - tempêtes
 - ...

élévation du niveau de la mer

projection 2000 – 2100 :
entre + 0,40 et + 0,80 m



Augmentation des enjeux socio-économiques sur les littoraux

- infrastructures portuaires
- urbanisation
- augmentation de la densité de population
- accroissement des pompages en eau dans les nappes phréatiques



subsidence

projection 2000 – 2100 :
entre 0,60 et 1 m



d'après G. Erkens *et al.*, 2015 (modifiée)

2. Confrontation spatiale sur les littoraux subsidents entre l'accroissement des enjeux socio-économiques et les effets cumulés du changement climatique avec l'élévation du niveau de la mer et l'intensification des événements météo-marins extrêmes

Enfin, seules les régions scandinaves ou celles du pourtour de l'océan Pacifique ne seront pas menacées par l'élévation du niveau de la mer. Dès lors, les littoraux du monde ne seront pas tous confrontés aux mêmes difficultés face à l'élévation du niveau de la mer, mais l'érosion des plages, le recul des falaises et la submersion des zones basses (marais maritimes et zones deltaïques) seront des conséquences directes de cette confrontation à long terme entre l'océan et les parties terrestres.

POUR ALLER PLUS LOIN...

Becker, Mélanie & al., « Water level changes, subsidence, and sea level rise in the Ganges–Brahmaputra–Meghna delta », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 117, n° 4, 2020, p. 1867-1876, en ligne : www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1912921117.

Erkens, Gilles, Bucx, T. H. M., Dam, Rien A.C., de Lange, Ger & Lambert, John, *Sinking coastal cities*, *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, n° 372, 2015, p. 189–198, en ligne : <https://doi.org/10.5194/piahs-372-189-2015>.

Lageat Yannick, *Les variations du niveau des mers*, Pessac, Presses universitaires de Bordeaux, 2019, 250 p.

Mercier, Denis (dir.), *Les Impacts spatiaux du changement climatique*, Londres, ISTE édition, 2021, 321 p.