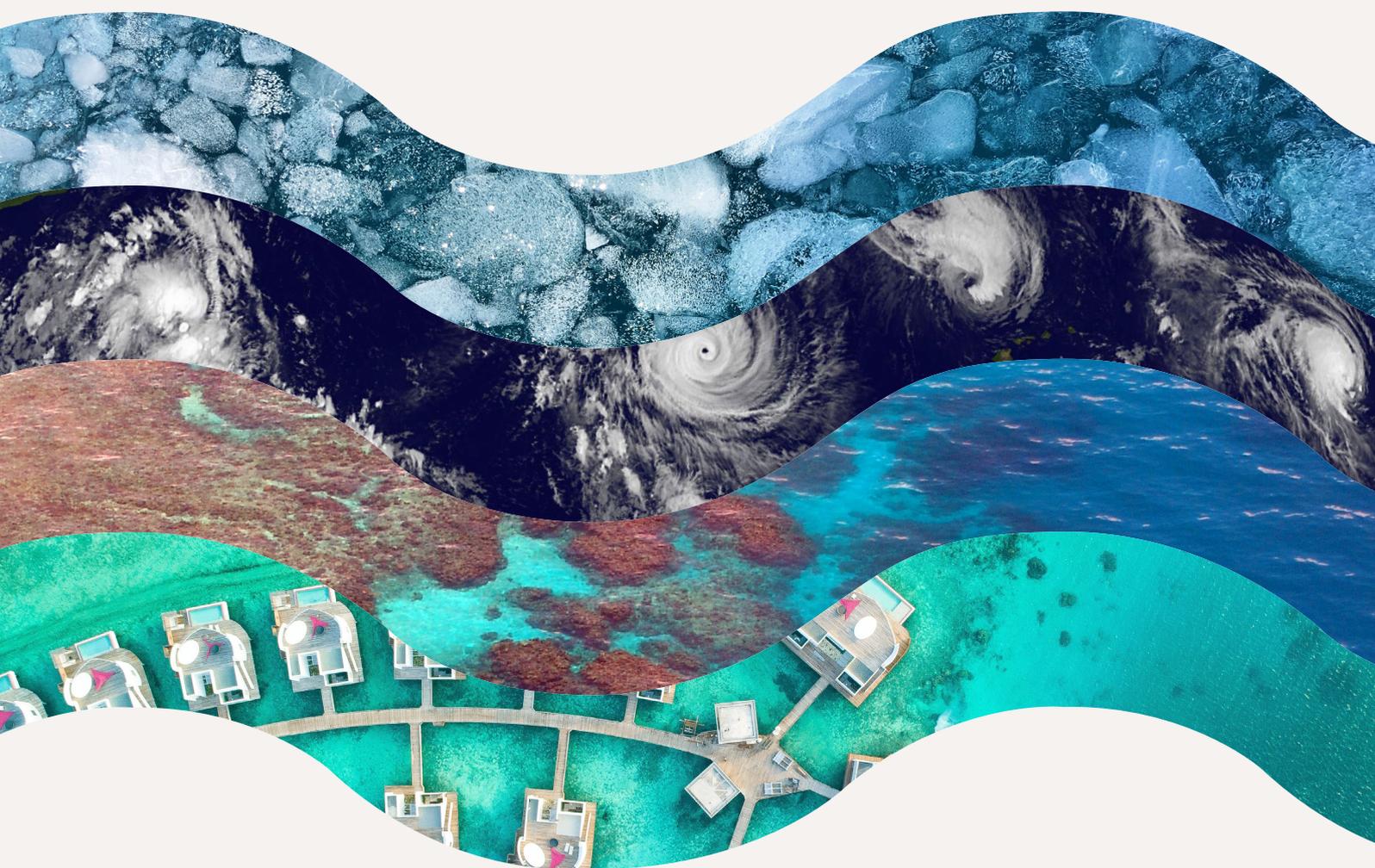


OCÉAN ET CHANGEMENT CLIMATIQUE : LES NOUVEAUX DÉFIS

*Focus sur 5 grands thèmes du
Rapport Spécial « Océan et Cryosphère »*



ocean-climate.org



TABLE DES MATIÈRES

- P3** **A propos de la Plateforme Océan et Climat**
- P7** **Introduction**
- FICHE 1**
- P9** **Océan et climat : où en est-on ?**
Christine Causse et Françoise Gaill
- FICHE 2**
- P13** **L'Océan se réchauffe**
Christine Causse
- FICHE 3**
- P18** **La mer monte de plus en plus vite**
Gabriel Picot
- FICHE 4**
- P22** **L'Océan Austral est sous pression**
Nadia Améziane
- FICHE 5**
- P26** **Vers des événements extrêmes**
Corinne Bussi-Copin
- FICHE 6**
- P30** **L'Océan perd de l'oxygène**
Michel Hignette
- P34** **SCHÉMA FONCTIONNEL**
Les conséquences des activités humaines sur les interactions océan et climat
Gabriel Picot
- P36** **CARTE HEURISTIQUE**
Océan et changement climatique : panorama des conséquences
Corinne Bussi-Copin, Céline Liret, Emilie Etienne
- P38** **Ressources**

Introduction

Vue de l'espace, notre Terre est bleue. Et pour cause, l'Océan, plus grand écosystème de la planète, représente 71% de la surface du globe et plus de 90% du volume de l'habitat disponible pour le monde vivant.

A la fois puits de carbone (captant 30% des émissions humaines) et réservoir de chaleur (ayant absorbé 93% de la chaleur émise depuis la révolution industrielle), l'Océan joue un rôle clé dans la régulation du climat en limitant le réchauffement climatique global. Il occupe également une place centrale dans nos sociétés humaines, puisqu'environ 30% de la population mondiale vit à moins de 100 km des côtes, que près de 3 milliards d'êtres humains dépendent des ressources en protéines d'origine marine, et que de nombreuses activités économiques comme le transport de marchandises ou le tourisme sont liées à la mer.

Cependant, l'Océan est aujourd'hui fortement affecté par les activités humaines, qui altèrent sa capacité à limiter les effets du changement climatique. Il est urgent de maintenir la qualité fonctionnelle des écosystèmes marins et de restaurer ceux qui se dégradent pour sauvegarder l'avenir de notre planète.

Une action politique forte et scientifiquement éclairée est aujourd'hui indispensable pour lutter contre le changement climatique. L'Océan a longtemps été le grand absent des négociations climatiques. C'est de ce constat qu'est née en 2014 la Plateforme Océan et

Climat, une coalition de scientifiques de différentes disciplines, ONG, aquariums, institutions françaises et internationales, réunis en amont de la COP21 pour intégrer l'Océan à l'agenda politique. Cette dynamique collective a été couronnée de succès, notamment par l'intégration de l'Océan dans le préambule de l'Accord de Paris, et la publication d'un rapport spécial sur « l'Océan et la Cryosphère dans le contexte du changement climatique » par le Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat (GIEC) en septembre 2019.

Seule ONG française à avoir participé à la relecture gouvernementale de ce document majeur, la Plateforme présente aujourd'hui « Océan et Changement Climatique : Les nouveaux défis. », un livret décryptant 5 grands thèmes abordés dans ce rapport : réchauffement, fonte des glaces, montée du niveau des eaux, événements extrêmes, et désoxygénation. Autant de phénomènes alarmants qui constituent de véritables défis pour l'avenir, et dont les interactions complexes sont résumées au sein des deux graphiques synthétiques « Les interactions Océan-Climat : des liens de cause à effet » et « Océan et changement climatique : panorama des conséquences ».

Un Océan en bonne santé, c'est un climat protégé, et la bonne compréhension de ces liens de cause à effet conditionne aujourd'hui notre capacité à préserver un monde durable, et respectueux du vivant dans son ensemble.

Fiche

7

OCÉAN ET CLIMAT : OÙ EN EST-ON ?

Christine Causse, Nausicaa.

Françoise Gaill, CNRS et Plateforme Océan et Climat.

L'océan et la cryosphère (neige, glace, glaciers, banquises, sols gelés) sont à la base des équilibres permettant la vie sur notre planète. Ils sont également au cœur de la régulation du climat. Le réchauffement global résultant de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liée aux activités humaines provoque de nets changements, parfois irréversibles, des milieux océaniques et de la cryosphère. L'impact de ces changements se fera sentir du sommet des montagnes jusqu'aux grands fonds océaniques, entraînant le bouleversement des conditions de vie et des risques sans précédents pour les organismes vivants, les écosystèmes et les communautés humaines.

1 LES CONSÉQUENCES DES ACTIVITÉS HUMAINES

Au cours de l'Histoire de notre planète, des changements ont affecté l'océan et la cryosphère de manière naturelle. Cependant, ceux qui se produisent actuellement sont sans équivalent par leur vitesse d'apparition, leur amplitude et leur étendue. Les résultats scientifiques démontrent que la majeure partie des changements qui affectent l'océan et la cryosphère ont des causes liées aux activités humaines. Avec le changement climatique, des conditions environnementales inédites depuis des millions d'années sont observées dans l'océan et la cryosphère.

comprennent notamment un réchauffement constant de l'eau de mer, l'acidification et la désoxygénation de l'océan, une diminution de la couverture neigeuse sur l'hémisphère nord, un retrait général des glaciers de montagne et des banquises du Groenland et de l'Antarctique, ainsi qu'une fonte du permafrost (terres gelées en permanence). Certains de ces changements sont irréversibles à l'échelle des sociétés humaines, allant de plusieurs décennies jusqu'à plusieurs siècles.

2 LE CHANGEMENT DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Les modifications qui touchent l'océan et la cryosphère jouent un rôle clé dans la détermination du climat planétaire. De plus, les impacts de ces changements sur les écosystèmes et les sociétés humaines sont désormais évidents (degré de confiance élevé). Ces changements

L'océan est au centre de la régulation du climat. En effet, il a déjà absorbé plus de 90% de l'excès de chaleur dû au changement climatique induit par les activités humaines et limite ainsi la hausse de température de l'atmosphère. Il stocke et redistribue d'énormes quantités de chaleur autour du globe par l'intermédiaire des courants marins, entre l'équateur et les pôles, et entre la surface et le fond. En se réchauffant, l'eau de mer se dilate et les masses d'eaux océaniques occupent alors plus d'espace, c'est l'un des principaux mécanismes responsables de l'élévation du niveau moyen des mers. L'augmentation de la fonte des glaces a contribué à l'accélération de la hausse du niveau moyen des océans au cours des dernières décennies (degré de confiance très élevé).

Par ailleurs, l'eau chaude est moins dense que l'eau froide. Ainsi, dans l'océan, les premières centaines de mètres d'eau plus chaude et moins salée recouvrent les eaux intermédiaires plus froides. Avec le réchauffement des eaux

de surface, ce phénomène de stratification s'accroît et le brassage des différentes masses d'eaux devient plus difficile.

Cela limite alors le transport d'oxygène vers les grands fonds marins où les organismes vivants en ont besoin pour respirer. Les micro-organismes ont également besoin de cet oxygène pour assurer la dégradation de la matière organique, indispensable au cycle de la vie dans l'océan.

En absorbant environ 20% à 30% des émissions de CO₂ liées aux activités humaines, l'océan a contribué à limiter le dioxyde de carbone dans l'atmosphère et ainsi réduire l'amplitude de l'effet de serre.

Toutefois, le CO₂ qui se dissout dans l'eau provoque une réaction chimique qui accroît l'acidité de l'eau de mer. Elle devient ainsi plus corrosive pour les organismes marins tels que les coraux ou les mollusques (moules, huîtres...) qui fabriquent un squelette ou une coquille calcifiée.

L'augmentation de la température de l'eau, la désoxygénation et l'acidification sont ainsi les trois menaces principales liées au changement climatique provoquant des bouleversements océaniques. Ces facteurs de stress ont une influence globale puisqu'ils affectent l'océan jusqu'à plus de 1 000 m de fond et impactent tous les écosystèmes marins.

Par ailleurs, les changements qui touchent la cryosphère sont également omniprésents. Les glaciers de montagne, l'océan Arctique et les calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique voient leurs glaces fondre avec le réchauffement de l'atmosphère et de l'océan (degré de confiance très élevé).

3 L'INFLUENCE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les modifications du taux d'évaporation à la surface des océans affectent le cycle de l'eau, essentiel au maintien de la vie sur Terre.

La couverture glaciaire en montagne et aux pôles reflète les rayons solaires et les renvoie vers l'espace - lorsque la glace fond, les surfaces de terre ou d'eau libérées sont plus sombres et ainsi absorbent plus ces rayons que les surfaces blanches, ce qui amplifie encore le réchauffement. De plus, lorsque le permafrost (terres gelées en permanence) fond, des quantités potentiellement très importantes de méthane sont relâchées dans

l'atmosphère. Il s'agit d'un gaz qui contribue fortement à l'effet de serre par son potentiel de réchauffement d'environ 25 fois celui du CO₂.

4 DES MENACES POUR LES SOCIÉTÉS HUMAINES

Environ 27% de la population mondiale, soit 1,9 milliards de personnes, vit à moins de 100 km des côtes et à moins de 100 m au-dessus du niveau de la mer. Environ 13% de la population mondiale vit dans l'Arctique ou dans les régions de hautes montagnes.

Leur vie, mais aussi celle des habitants vivant à l'intérieur des terres ou loin des régions glacées, est liée à l'état de l'océan et de la cryosphère. En effet, ces deux systèmes naturels influencent les conditions du maintien de la vie sur la planète.

Toutes les populations dépendent de l'océan qui est le siège de nombreuses activités : transport de marchandises et de personnes, nourriture (pêche et aquaculture), tourisme, santé, loisirs...

Les produits de la mer représentent 20% de l'apport en protéines (hors céréales) de l'alimentation humaine mondiale et 80% du transport international de marchandise se fait par la mer.

La sécurité des populations côtières est liée à l'état de l'océan. L'augmentation rapide du niveau de la mer et de la fréquence de tempêtes violentes menace des millions de vies, mais aussi les moyens de subsistance de nombreuses populations et des milliards de dollars d'infrastructures côtières.

Entre autres, la montée du niveau de la mer provoque des entrées d'eaux salées dans les terres qui altèrent les nappes phréatiques (sources d'eau potable) et les eaux d'irrigation le long des côtes. En parallèle, les changements de la cryosphère vont avoir des conséquences sur la sécurité d'approvisionnement en eau des populations qui dépendent de l'eau de fonte des glaciers.

De plus, les changements affectant le cycle de l'eau - comme par exemple l'intensité et la fréquence des pluies qui sont liées à l'évaporation de l'eau de mer - accroissent le risque d'inondations dans certaines régions et de sécheresses dans d'autres. L'adaptation à ces phénomènes va passer par la mise en place de systèmes de régulation du régime des eaux (eaux provenant de la fonte des glaces et gestion des eaux pluviales par exemple).

Les écosystèmes marins réagissent aux modifications du milieu liées au changement climatique. Les récifs coralliens sont de plus en plus sujets à des mortalités de masse. En effet, lorsque la température de l'eau augmente ils subissent des phénomènes de blanchissement. Ainsi, ils perdent les algues unicellulaires avec lesquelles ils vivent en symbiose et qui leur donnent leur belle couleur, puis deviennent blancs et sont privés de 70% de leur nourriture.

Les espèces marines qui vivent sur le récif perdent ainsi leur habitat naturel. De plus, les organismes qui se construisent un squelette ou une coquille calcifiée (coraux, mollusques) sont eux menacés par l'acidification des eaux. Les facteurs de stress liés au changement climatique se combinent avec d'autres perturbations du milieu d'origine humaine comme par exemple la pollution, ce qui augmente leur vulnérabilité. Ainsi, les poissons subissent la pression de la pêche qui s'ajoute au changement de leur milieu lié au réchauffement climatique.

Beaucoup d'espèces voient leur aire de répartition se modifier avec l'évolution de leur environnement : localement certaines espèces disparaissent alors que des espèces nouvelles s'introduisent. La disponibilité et l'abondance de ressources marines sont ainsi modifiées.

5 FAIRE FACE AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Réduire les émissions de gaz à effet de serre permettrait de limiter les risques et même de les supprimer dans certains cas. Ainsi, l'efficacité des mesures d'adaptation en serait renforcée.

Toutefois, des changements tels que l'élévation du niveau de la mer ou la perte de la couverture glaciaire vont se poursuivre pendant plusieurs siècles quels que soient les scénarios d'émission de gaz à effet de serre. De plus, certains des bouleversements en cours qui affectent l'océan et la cryosphère ne sont pas réversibles (sur des échelles de temps allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles).

Des actions urgentes doivent donc être entreprises pour réduire les émissions, atténuer les conséquences du changement climatique et s'adapter à leurs effets.

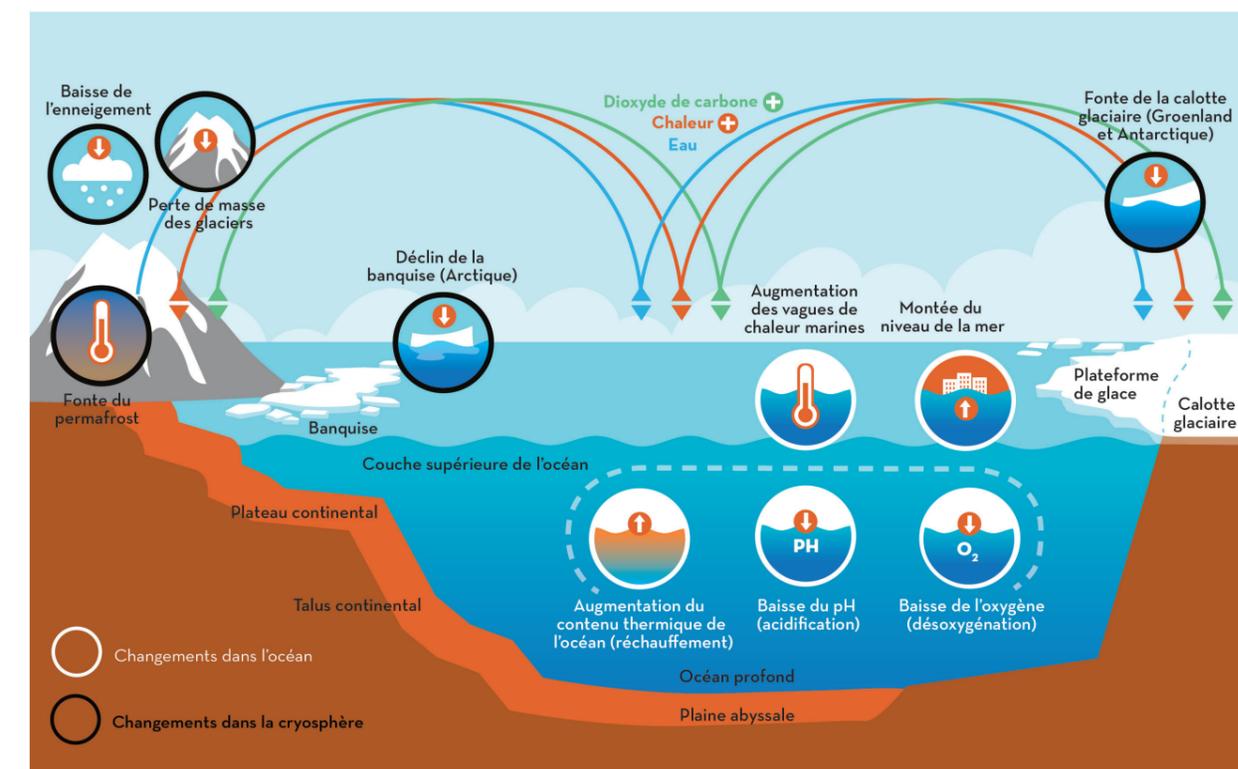


Figure 1: Les composants clés des systèmes océaniques et de la cryosphère, et leur évolution dans le contexte du changement climatique.

Source: IPCC, SROCC, 2019. Chapitre 1

Les effets du changement climatique sur l'océan incluent la hausse du niveau des mers, l'accroissement du contenu thermique de l'océan et du nombre de vagues de chaleur marines, la désoxygénation et l'acidification. Ceux affectant

la cryosphère incluent la diminution de la couverture glaciaire Arctique, la perte de glace en Antarctique et au Groenland, la perte de masse des glaciers, la fonte du permafrost et la diminution de la couverture neigeuse.

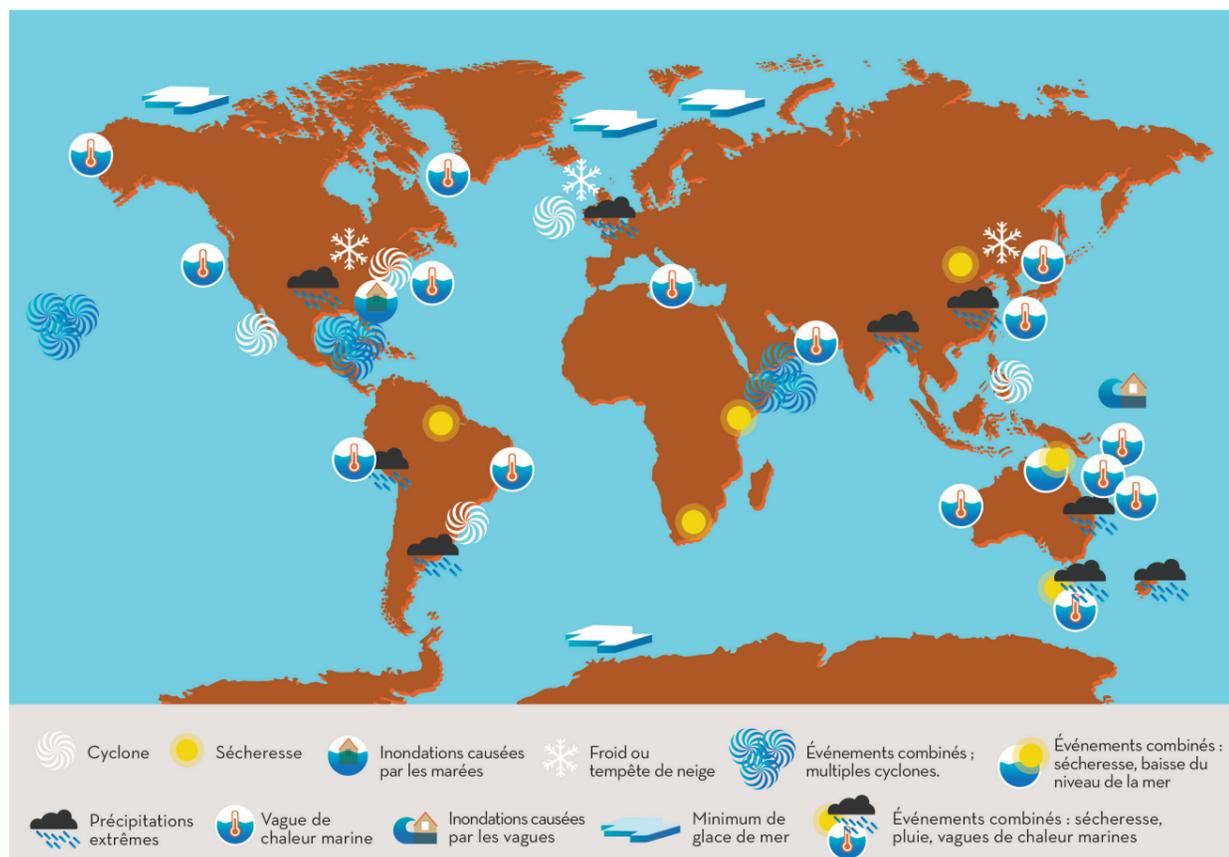


Figure 2 : Localisations des régions où se sont produits les événements extrêmes en lien avec les changements affectant l'océan (sélection d'évènements qui ont eu lieu entre 1998 et 2017).

Source: IPCC, SROCC, 2019. Chapitre 6

À RETENIR

- L'océan a absorbé plus de 90% de l'excès de chaleur et 30% du dioxyde de carbone liés aux activités humaines.
- L'océan va continuer à absorber de la chaleur au cours de ce siècle. Selon les modèles, il est probable qu'il emmagasine entre 3 et 6 fois ce qu'il a déjà absorbé depuis 1900 : soit de 1 500 ZJ (un Zeta Joule = 1021 Joules) à 3 000 ZJ additionnels d'ici 2100.
- On observe que le pH de l'océan (mesure de l'acidité) diminue de ~0.02 unités de pH par décennie depuis que les mesures existent.
- Les prévisions globales estiment que la diminution du taux d'oxygène dans l'océan sera de 3,5% d'ici 2100 (degré de confiance moyen).
- La hausse du niveau moyen des mers est liée aux taux d'émissions de gaz à effet de serre. Sa valeur sera comprise entre 0,43 m (intervalle probable entre 0,29 et 0,59) et 0,84 m (intervalle probable entre 0,61 et 1,10) en 2100 selon les scénarios d'émission.

Fiche 2

L'OCÉAN SE RÉCHAUFFE

Christine Causse, Nausicaa

L'océan, qui a déjà absorbé 93% de l'excès de chaleur lié au changement climatique planétaire, se réchauffe à toutes les profondeurs, avec des variations régionales. Ce phénomène va se poursuivre au XXI^{ème} siècle et pendant plusieurs siècles.

- À l'échelle mondiale, le réchauffement de l'océan est plus prononcé près de la surface. De 1971 à 2010, les 75 premiers mètres de profondeur se sont réchauffés de 0,11 °C par décennie.
- Les vagues de chaleur océaniques et les événements extrêmes plus fréquents auront des conséquences sur les écosystèmes marins et côtiers en altérant leur fonctionnement et en provoquant une diminution de la biodiversité.
- La mise en place de mesures d'adaptation et d'atténuation peut limiter les conséquences sur les communautés humaines (sécurité, santé, ressources et activités économiques).

1 DE QUEL PHÉNOMÈNE S'AGIT-IL ?

L'océan mondial couvre 71% de la surface de la planète et contient environ 97% de l'eau sur Terre. Il joue un rôle déterminant pour le climat mondial puisqu'il échange en permanence de la chaleur avec l'atmosphère, la stocke et la redistribue de l'équateur vers les pôles et de la surface vers le fond par l'intermédiaire des courants marins. Depuis 1950, l'océan a absorbé plus de 90% de l'excès de chaleur accumulé dans le système climatique lié à l'effet de serre (degré de confiance élevé). L'océan modère ainsi les fluctuations du climat et limite le réchauffement planétaire.

Avec le réchauffement planétaire, la température de l'océan augmente. En effet, la température moyenne de l'océan de surface - entre 0 et 75 m de profondeur - a augmenté depuis les années 1970 de 0,11°C par décennie (degré de confiance élevé). Entre 2004 et 2016, les couches océaniques supérieures (0 à 700 m) et intermédiaires (700 à 2 000 m) se sont réchauffées (quasiment certain), tout comme les couches profondes en-dessous de 4 000 m dans l'hémisphère sud (degré de confiance élevé).

La température de l'air à la surface de l'océan Arctique augmente environ deux fois plus vite que la température moyenne mondiale. Une augmentation de température même légère peut potentiellement déséquilibrer et faire fondre rapidement de grandes surfaces de glace. En se réchauffant, l'eau se dilate et occupe plus d'espace, ce qui contribue à l'augmentation du niveau moyen de la mer.

Dans l'océan, différentes couches d'eau se superposent : dans les premières centaines de mètres, des eaux plus chaudes et peu salées recouvrent des eaux froides et salées plus denses. Ainsi, le réchauffement des eaux de surface accentue le phénomène de stratification de l'océan. Le mélange entre eaux de surface et eaux profondes diminue, ce qui limite leurs échanges en chaleur, en carbone et en oxygène. Il est très probable que ce phénomène de stratification se poursuive de façon significative au cours du XXI^{ème} siècle dans les premiers 200 m de la colonne d'eau.

À la surface de la Terre, l'énergie du soleil est transformée en chaleur qui évapore l'eau, détermine les mouvements atmosphériques, les courants marins et le climat. Depuis les années 1950, l'atmosphère et l'océan se sont réchauffés à la suite de l'influence des activités humaines sur le climat.

Environ 84% à 90% des vagues de chaleur océaniques observées dans l'océan au cours de la dernière décennie peuvent être attribuées au réchauffement climatique induit par les activités humaines (degré de confiance élevé).

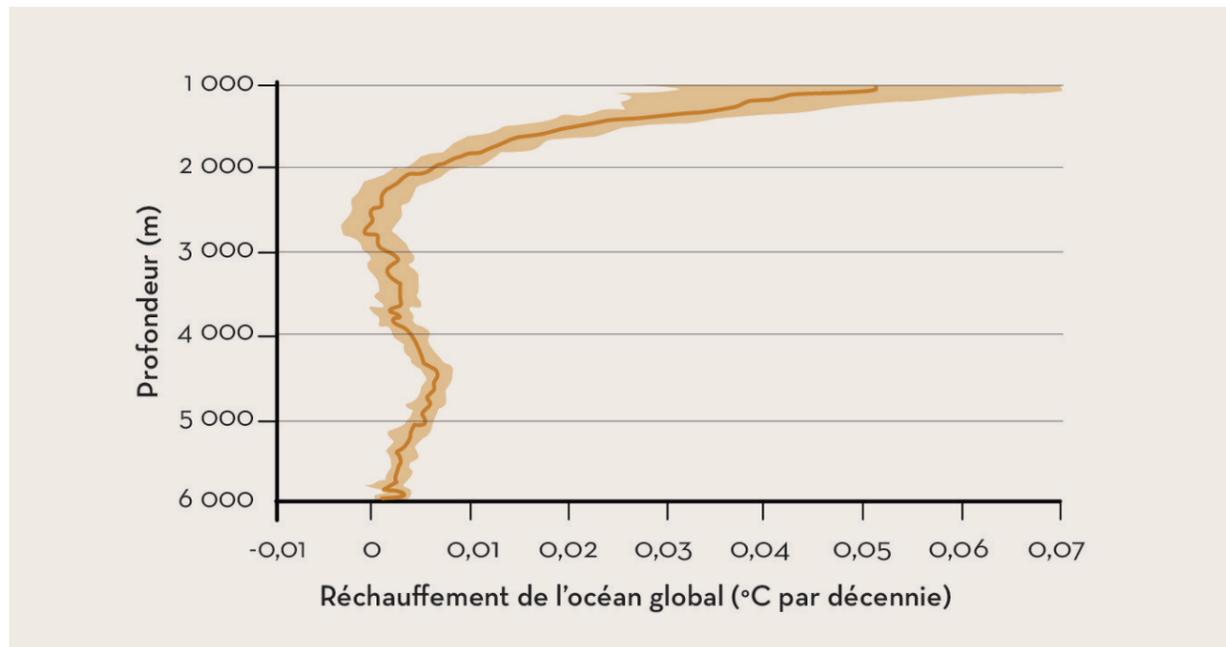


Figure 1 : Réchauffement de 1981 à 2018 en fonction de la profondeur avec des intervalles de confiance de 90%.
Source: IPCC, SROCC, 2019. Chapitre 6

2 LES CONSÉQUENCES SUR LES SYSTÈMES NATURELS

Que constate-t-on aujourd'hui ?

Le stockage de chaleur dans l'océan accroît les risques de vagues de chaleur et autres événements extrêmes. Les vagues de chaleur océaniques sont des épisodes inhabituels de réchauffement des températures de surface de la mer qui perdurent de quelques jours à plusieurs mois et peuvent concerner des milliers de km². Ces vagues de chaleur et les grandes poches d'eau anormalement chaudes qui en résultent, peuvent être observées dans plusieurs régions marines. Les premières vagues de chaleur marines ont été étudiées en Méditerranée en 2003 avec des températures en été de 1 à 3°C au-dessus des moyennes saisonnières. Puis, en 2011 au large de la côte ouest de l'Australie où la température a atteint + 5°C par rapport à la normale saisonnière pendant 10 semaines. De 2013 à 2015, le Pacifique Nord-Ouest a connu les plus fortes vagues de chaleur jamais enregistrées (+ 6,2°C). La fréquence de ces vagues de chaleur a très probablement doublé depuis les années 1980.

Les événements extrêmes, tels que les vagues de chaleur marines ou les tempêtes, accentuent le changement des écosystèmes (degré de confiance très élevé). De nouvelles conditions environnementales dans l'océan vont avoir des conséquences sur la physiologie, la distribution et l'écologie des organismes marins, du plancton à la baleine, et donc sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes (degré de confiance élevé).

Les changements affectant les océans polaires et la cryosphère ont un impact sur la production primaire marine (degré de confiance moyen) et donc sur les chaînes alimentaires et les écosystèmes (degré de confiance élevé). Cela a des conséquences sur l'abondance, la composition en espèces et la répartition géographique du zooplancton, des crustacés, des poissons et des prédateurs qui s'en nourrissent. Des espèces subarctiques vont se déplacer vers le nord et entrer en compétition avec des espèces de l'Arctique (degré de confiance moyen). Certains organismes marins vont par ailleurs devenir plus rares localement.

Par ailleurs, les récifs coralliens sont touchés par des phénomènes de blanchissement (expulsion des algues symbiotiques entraînant la mort des coraux) liés à l'augmentation de la température de l'eau et aux vagues de chaleur marines. Selon les scénarios basés sur les émissions

les plus basses (+1,5°C), 90% des coraux pourraient être impactés par le changement climatique.

Que peut-il se passer à terme selon les différents scénarios ?

Au cours du XXI^{ème} siècle, la chaleur va continuer à pénétrer de la surface vers le fond et l'océan devrait continuer à se réchauffer pendant plusieurs siècles. Sur

cette même période, il est très probable que le phénomène de stratification des eaux lié au réchauffement des eaux de surface se poursuive de façon significative.

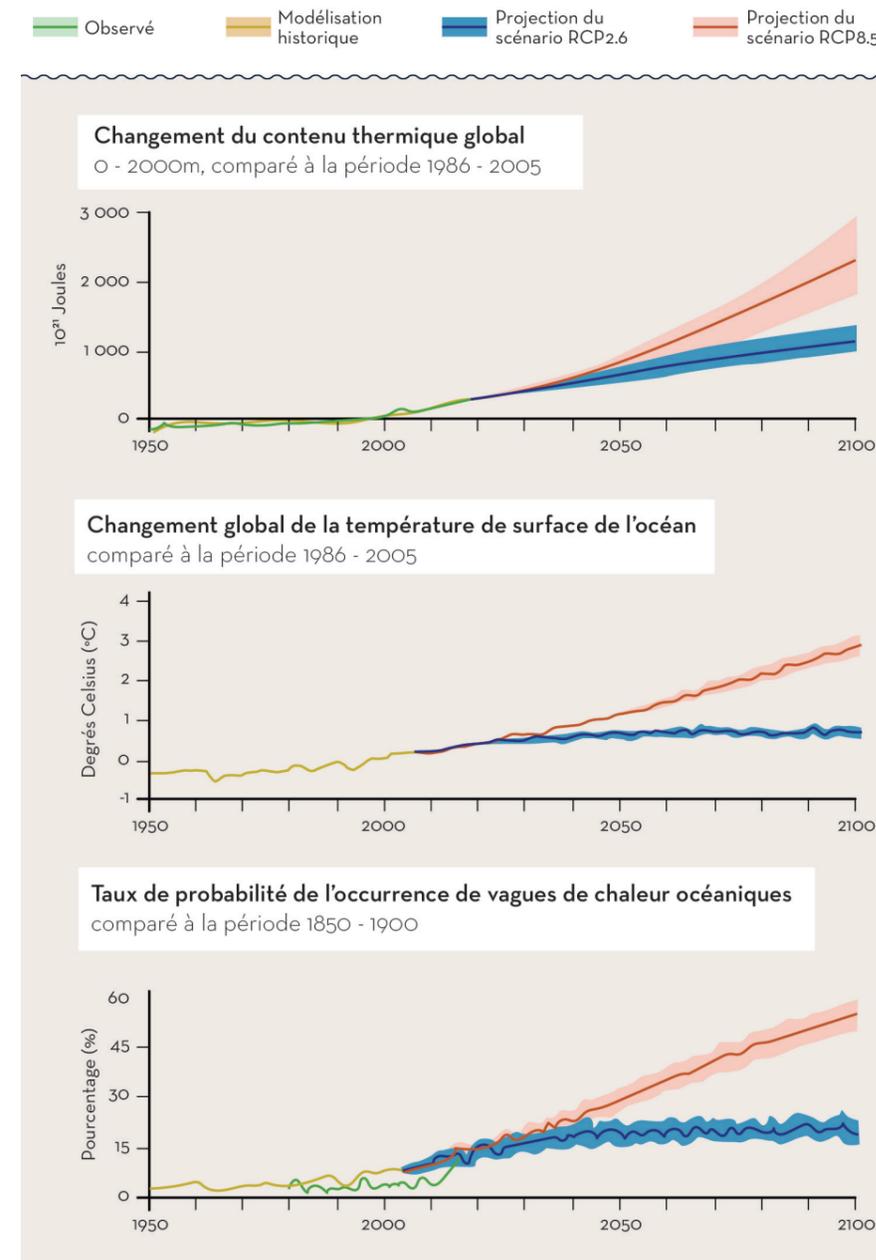


Figure 2 : Changements affectant l'océan: observations et projections concernant le contenu thermique et la probabilité de l'occurrence de vagues de chaleur selon les scénarios d'émissions basses (RCP2.6) et hautes (RCP8.5).
Source: IPCC, SROCC, 2019. SPM

Changement global de la température de surface de l'océan (°C) par rapport à la période 1986-2005 avec un intervalle de 5-95%.

Taux de probabilité de l'occurrence de vagues de chaleur océaniques: moyenne globale par rapport à la période 1850-1900 avec un intervalle de 5-95%. Un taux de probabilité de 10 est équivalent à une probabilité dix fois supérieure de voir se produire une vague de chaleur par rapport à ce qui s'est produit dans les années 1850-1900.

De plus, les vagues de chaleur océaniques devraient très probablement devenir plus intenses, plus longues et plus étendues spatialement. Les événements extrêmes qui se produisaient rarement (vagues de chaleur océaniques, cyclones très violents) devraient devenir de plus en plus fréquents au cours du siècle selon tous les scénarios d'émissions.

Par ailleurs, certains courants marins de l'Atlantique pourraient ralentir. Selon tous les scénarios, il est très probable que la grande boucle de circulation marine qui parcourt l'Atlantique (circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique ou AMOC) s'affaiblisse au cours du XXI^{ème} siècle (degré de confiance élevé). Cependant, il est très improbable que ce courant s'effondre ou subisse une transition brusque. Si cela se produit, les impacts sur le climat seraient importants. Dans certains modèles climatiques, le risque d'un ralentissement brutal du courant polaire de l'Atlantique appelé gyre subpolaire (SPG) a été identifié sur des échelles plus courtes, mais avec des impacts potentiels moins importants.

De nombreuses modifications affectant l'océan et la cryosphère ont un effet rétroactif sur le changement climatique. L'évaporation accrue de l'eau océanique dû au réchauffement de l'eau a un impact, par exemple, sur le cycle de l'eau car elle augmente la quantité d'eau contenue dans l'atmosphère, induisant des précipitations accrues.

On s'attend à des déclin d'espèces marines aux basses latitudes (degré de confiance moyen), une extension des aires géographiques vers le nord (degré de confiance élevé), une arrivée plus précoce d'événements biologiques (degré de confiance élevé) et un déplacement général de la biomasse et de la composition des espèces (degré de confiance très élevé). Les effets combinés du réchauffement de l'eau, de la désoxygénation, de l'acidification et de changements dans la disponibilité des nutriments devraient accentuer la perte de richesses des espèces des écosystèmes côtiers. Les communautés benthiques (espèces qui vivent sur le fond) de l'océan profond vont subir des changements structurels et fonctionnels qui auront des conséquences sur le cycle du carbone au cours de ce siècle (degré de confiance moyen).

3 LES CONSÉQUENCES SOCIO-ÉCONOMIQUES

Les impacts déjà ressentis par les communautés humaines

Les changements affectant la répartition et la disponibilité des ressources biologiques marines impactent les communautés humaines qui dépendent directement de l'océan, comme celles qui vivent de la pêche et de l'aquaculture. Il y a en effet des conséquences sur la

sécurité alimentaire, économique, la culture, les modes de vie traditionnels et des risques pour la santé.

Les impacts pressentis à terme

Les services écosystémiques assurés par l'océan et la cryosphère (stockage de chaleur et de carbone, fourniture d'eau et de nourriture, ressources en énergie renouvelable, commerce, transport, tourisme, loisir, culture, santé...) vont être modifiés, altérés ou supprimés avec le changement climatique (degré de confiance élevé). Vont ainsi apparaître des menaces accrues impactant les services assurés par les écosystèmes marins, notamment des risques pour la santé humaine et des risques de conflits liés aux changements. De plus, les modifications du régime des pluies liées à la hausse des températures océaniques vont menacer la sécurité de l'approvisionnement en eau, avec notamment des risques accrus de tempêtes sévères et d'inondations dans certaines régions et de sécheresses dans d'autres.

4 COMMENT FAIRE FACE ?

L'adaptation

Des actions doivent être envisagées pour s'adapter aux risques hydriques (inondations ou sécheresses) telles que la mise en place d'infrastructures pour gérer les pluies, récupérer l'eau de fonte et réguler le débit des cours d'eau, afin de sécuriser l'approvisionnement en eau pour les populations qui en dépendent. Au niveau agricole, des stratégies d'adaptation pourraient inclure le développement de cultures plus adaptées aux futures conditions climatiques.

Investir dans des stratégies de prévention (déployer des systèmes d'observation en mer type bouées flottantes, des équipements de prévision météorologique, des systèmes d'alerte, etc.) face aux événements extrêmes est très probablement moins onéreux que le coût de réparation après un désastre climatique (degré de confiance moyen). S'adapter aux menaces inclut l'amélioration des infrastructures côtières, la relocalisation des services essentiels et une réponse plus rapide et plus efficace de la part des services d'urgence et de santé, avec dans certains cas la nécessité de relocalisation des populations.

Les écosystèmes côtiers (marais, mangroves, herbiers, kelps, récifs de coraux, bancs d'huîtres et de moules) offrent une protection et une réduction des risques aux communautés littorales. Des mesures de préservation et de restauration de ces écosystèmes peuvent offrir de nombreux bénéfices (y compris économiques) aux populations côtières (degré de confiance élevé).

Par ailleurs, s'appuyer sur les savoirs autochtones et locaux permettrait également de compléter le savoir scientifique pour mettre en place des réponses efficaces adaptées au contexte.

L'atténuation

Il est nécessaire d'adopter des politiques de réduction des émissions de carbone ambitieuses. La mise en place d'actions urgentes pour atténuer le réchauffement global représente la meilleure option pour limiter les changements affectant l'océan et la cryosphère et pour trouver des solutions d'adaptation et de développement durable efficaces.

Les écosystèmes tels que les mangroves, marais, littoraux et herbiers peuvent représenter une solution basée sur la nature (carbone bleu) : le stockage de carbone par unité de surface effectué par ces écosystèmes marins est beaucoup plus important que pour des surfaces végétalisées terrestres (degré de confiance élevé).

Par ailleurs, le renforcement d'outils légaux et des conventions internationales telles que la Convention sur le Droit de la mer des Nations unies (UNCLOS) peut faciliter la mise en place, le suivi et assurer le respect de mesures adéquates face aux défis du changement climatique touchant l'océan (dispositions sur le contrôle des pollutions en mer ou la préservation des ressources vivantes et des écosystèmes, etc.). La coopération internationale sur la gouvernance de l'océan, des côtes et de la cryosphère est essentielle face à ces défis climatiques.



LA MER MONTE DE PLUS EN PLUS VITE

Gabriel Picot, Aquarium tropical de la Porte Dorée

Le rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère, paru le 25 septembre 2019 alerte en particulier sur les problèmes posés par la montée du niveau de la mer. Déjà observée dans de nombreuses régions, avec des effets parfois perceptibles, elle devrait s'accélérer fortement et se poursuivre dans les siècles à venir, en menaçant de nombreux territoires côtiers et de basse altitude.

1 LA MONTÉE DU NIVEAU DE LA MER S'ACCÉLÈRE

Aux débuts de l'ère industrielle, l'homme a installé des marégraphes dans les ports d'Europe pour mesurer et enregistrer les variations du niveau de la mer. Il s'agissait à l'origine de mesurer les variations liées aux marées. Ces enregistrements ont permis de calculer qu'au XX^{ème} siècle, le niveau moyen de l'océan a augmenté de 17 cm en 100 ans, à la vitesse moyenne de 1,4 mm par an.

À partir des années 1990, les mesures réalisées par les satellites ont révélé que de 1994 à 2018, l'océan est monté de 8,5 cm, soit à une vitesse moyenne de plus de 3,6 mm/an. L'élévation du niveau de l'océan s'est donc accélérée entre le milieu du XX^{ème} siècle et ces dernières décennies (degré de confiance élevé).

Cette progression peut varier de plus ou moins 30% selon les régions du Monde. En Asie du Sud-Est par exemple, l'océan monte très rapidement, jusqu'à 15 mm/an dans certaines zones. En revanche, il baisse près des côtes de l'Alaska. Ceci s'explique par le fait que la chaleur de l'océan est redistribuée de manière non-homogène par la circulation océanique, entraînant une dilatation de l'eau variable selon les régions.

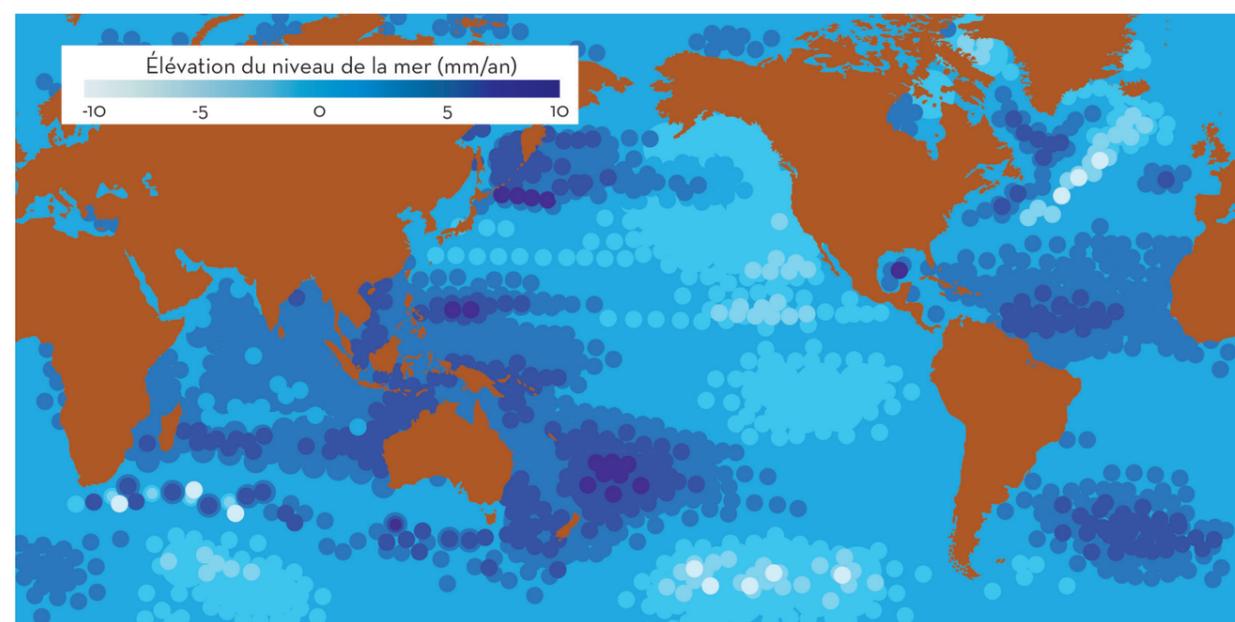


Figure 1 : Élévation du niveau de la mer entre 1993 et 2015. Source : ESA

2 QUELLES SONT LES CAUSES DE L'ÉLEVATION DU NIVEAU DE L'OCÉAN ?

La dilatation de l'eau sous l'effet de la température

Lorsqu'un corps chauffe, il prend plus de place. En se réchauffant, l'eau de mer se dilate donc le niveau de la mer augmente. On estime que depuis 1993 et le début des observations satellites, la dilatation explique une montée du niveau de la mer global de 1,1 (+/-0,3) mm/an.

La fonte des glaciers

Les glaciers couvrent environ 730 000 km² des terres émergées. Depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (vers 1850), on observe dans presque toutes les chaînes de montagnes une

fonte des glaciers, variable entre 10 cm et 2 m d'équivalent d'eau par an. Depuis 2006, cette perte est estimée à 278 (+/-113) milliards de tonnes/an. Ce phénomène s'explique en partie par la réponse retardée des glaciers au réchauffement naturel de la planète après cette petite glaciation. Entre 2006 et 2015, on estime que les glaciers ont contribué pour 0,77 (+/-0,31) mm/an à la hausse de la mer.

La fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique

Le réchauffement de l'atmosphère conduit à une fonte importante de la glace qui recouvre le Groenland et le continent Antarctique. L'eau de fonte finit par se retrouver dans la mer. On observe depuis 1992 une fonte très marquée dans les régions côtières du Groenland et en Antarctique de l'Ouest. Entre 2006 et 2015 les calottes polaires ont perdu chaque année environ 433 (+/-30) milliards de tonnes/an. Cumulés, ces apports représentent une hausse du niveau de la mer de 1,12 (+/-0,08) mm/an sur cette même période.

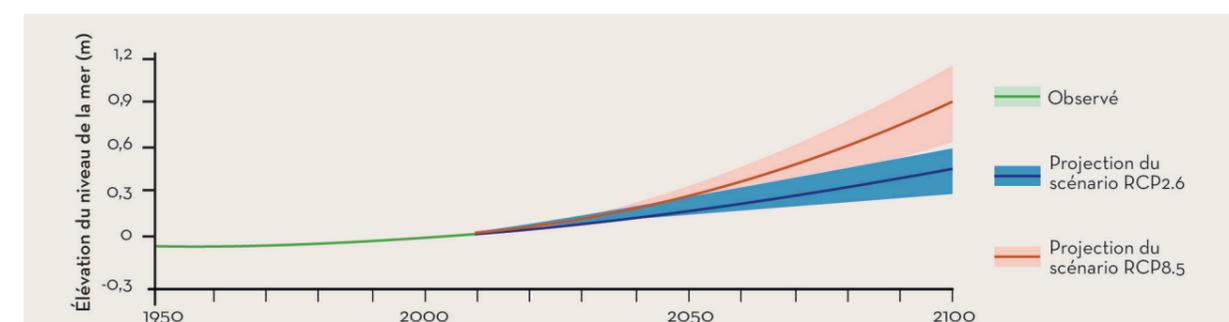


Figure 2 : Élévation globale du niveau moyen de la mer de 1950 à 2100, comparé à la période 1986-2005.

Source : IPCC, SROCC, 2019. SPM

3 LES CONSÉQUENCES SUR LES SYSTÈMES NATURELS

Que constate-t-on aujourd'hui ?

Depuis 1970, la montée du niveau de l'océan est principalement la conséquence des activités humaines.

Le rapport du GIEC sur l'océan et la cryosphère, paru le 25 septembre 2019, montre une confiance très forte sur le fait que l'élévation du niveau de la mer s'est accélérée dans les dernières décennies en raison de l'augmentation de l'arrivée d'eau par la fonte des glaces continentales. Les glaciers et les calottes polaires du Groenland et de l'An-

tarctique sont maintenant la principale source d'élévation du niveau des mers.

Localement, notamment dans les deltas des grands fleuves, le pompage par l'homme des eaux souterraines entraîne un affaissement du sol. Cette baisse du niveau du sol équivaut à une hausse relative du niveau de la mer. Cet effet s'ajoute à la montée du niveau marin liée au réchauffement et explique en partie les grandes variations régionales.

Cependant, dans ces régions de deltas, il est probable que l'effet des phénomènes de vagues de tempête soit supérieur à celui de la montée du niveau marin.

Et dans le futur ?

La montée du niveau de l'océan est un phénomène irréversible à l'échelle des siècles à venir et au-delà.

L'inertie du système et la faible vitesse des transports de chaleur font que la chaleur supplémentaire déjà émise par les activités humaines entraînera une hausse durable et à long terme du niveau de la mer, probablement de plusieurs mètres à l'échelle du millénaire.

Les modèles convergent sur le fait que dans un contexte de fortes émissions de gaz à effet de serre, l'Antarctique va probablement contribuer pour plusieurs dizaines de centimètres à l'élévation du niveau marin d'ici la fin du XXI^{ème} siècle. Les nouvelles prédictions, qui tiennent compte de cet effet, permettent d'envisager une augmentation d'ici 2100 de 29 à 59 cm si les émissions de gaz à effet de serre sont très fortement réduites, et de 61 cm à 110 cm au rythme des émissions actuelles. La vitesse de montée des eaux pourrait alors approcher les 19 mm/an en 2100, contre 3 mm/an actuellement.

Au-delà de 2100, les prévisions d'augmentation du niveau des mers sont très hasardeuses car les modèles actuels représentent encore mal les processus physiques du comportement des calottes polaires. En particulier, les phénomènes d'effondrement des plateformes de glace sont très difficiles à prévoir et peuvent avoir un "effet de seuil" sur le comportement de la calotte entière.

Au niveau des deltas, l'augmentation du niveau prévus montre qu'il est essentiel de prendre en compte les phénomènes locaux, comme les vagues et l'affaissement du terrain, pour pouvoir prévoir les impacts du niveau de la mer.

4 LES CONSÉQUENCES SUR LES COMMUNAUTÉS HUMAINES ET SUR L'ÉCONOMIE

L'élévation du niveau de la mer est une préoccupation majeure pour les zones côtières où vit 27% de la population mondiale et où se trouvent plus de la moitié des mégapoles du monde. Les îles et les côtes basses présentent un risque élevé d'impacts liés au changement climatique. En effet, les impacts de l'élévation du niveau des mers sont de plus en plus démontrés par différentes études. Ils peuvent concerner les écosystèmes eux-mêmes, les services rendus par ces écosystèmes à l'économie, les infrastructures côtières, l'habitabilité de la région, les moyens de subsistance des communautés et les valeurs culturelles et esthétiques.

Cependant, attribuer les impacts observés localement uniquement à la montée du niveau de la mer reste difficile en raison de l'influence combinée d'autres facteurs. L'augmentation de la population, la disparition des habitats et la dégradation de l'environnement due au développement et à la pollution jouent un rôle prépondérant dans la vulnérabilité des communautés côtières.

De plus, le développement durable est mis en péril par les effets de plus en plus importants des changements climatiques sur l'océan. Les populations vivant sur les côtes

sont particulièrement menacées, ainsi que les territoires dont les frontières vont être amenées à être modifiées en raison de la montée des eaux.

Bientôt, ses effets seront beaucoup plus forts, particulièrement sur les populations les plus vulnérables. Il est très probable que les effets de facteurs locaux qui ne sont pas liés au climat, comme l'extension des habitations, la dégradation des environnements côtiers ou les pollutions, vont jouer un rôle essentiel dans la vulnérabilité des populations face à la montée du niveau de la mer.

Certains milieux sont extrêmement exposés et vulnérables au changement climatique et à la montée du niveau de la mer. Il s'agit principalement de zones très peuplées et assez peu développées comme certaines petites îles, les deltas et les milieux côtiers ruraux ; mais également de zones où les populations dépendent fortement de services apportés par l'environnement (tourisme, pêche...), comme les récifs coralliens ou l'océan Arctique.

Les effets de l'élévation du niveau de la mer vont s'y intensifier dans le futur. Les villes et mégacités côtières très développées et densément peuplées vont aussi devoir faire face à des risques croissants liés à la montée des eaux.

Il est probable que cette montée du niveau marin engendre un monde divisé : d'un côté des zones riches et très peuplées qui auront réussi à se protéger derrière des barrages adaptés et coûteux ; de l'autre côté des zones pauvres, affrontant les effets de la montée de l'eau ou devant abandonner de vastes territoires conquis par la mer.

La combinaison entre montée des eaux et changements concernant les cyclones accentue les risques. En effet, il est probable que dans le futur la proportion de cyclones tropicaux les plus forts (intensité 4 et 5) augmente, ainsi que la quantité de précipitations associées.

Il est moins sûr en revanche que le nombre total de cyclones augmente (degré de confiance moyen). Les effets combinés de la montée du niveau marin et des cyclones les plus forts pourraient entraîner des submersions côtières extrêmement importantes (degré de confiance élevé).

Quels que soient les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, ces submersions deviendront communes en 2100 (degré de confiance élevé).

Les villes côtières et les îles seront spécifiquement touchées dès 2050. Cependant, il existe une grande variabilité régionale de ces épisodes de très hautes eaux, à la fois en intensité et en fréquence.

Pour certaines régions, comme les îles du Pacifique et la côte ouest de l'Amérique, ces épisodes historiquement centennaux, deviendront statistiquement annuels en milieu de siècle, et même mensuels d'ici 2100.

5 COMMENT FAIRE FACE À LA MONTÉE DU NIVEAU MARIN ?

L'atténuation : réduire le problème à la source, en limitant le réchauffement climatique

La montée du niveau marin d'ici la fin du siècle va dépendre fortement des émissions de gaz à effet de serre. De fortes émissions vont accélérer la fonte de l'Antarctique (degré de confiance élevé), très contributrice de l'élévation du niveau des mers. Une réduction drastique des émissions réduirait nettement les risques, mais ne les éliminerait pas pour autant. Elle permettrait cependant d'avoir le temps de mettre en place des solutions d'adaptation plus variées.

Pour la première moitié de ce siècle, les différences selon les scénarios d'émissions restent faibles. Mais elles risquent d'augmenter ensuite de façon importante.

L'adaptation : ajuster les aménagements et les populations aux nouveaux risques entraînés par la montée du niveau marin

Il existe toute une variété de méthodes pour s'adapter aux risques liés à la montée des eaux, de l'ingénierie classique (construction de digues, surélévation de bâtiments, reconstitution de plages...) à l'adaptation basée sur les écosystèmes (aménagement de plaines d'inondation, entretien de protections naturelles...).

Pour être plus efficace, l'adaptation des infrastructures devra être accompagnée de mesures d'adaptation sociale, comme le développement de systèmes d'alerte, la gestion des urgences, le déplacement de zones d'habitations ou d'activité économique, voire l'abandon de territoires entiers. Toutefois, les déplacements, les migrations et les délocalisations, s'ils peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur ceux qui se retirent, en ont également sur les communautés qui les reçoivent.

Ces efforts d'aménagement et de protection permettront de réduire les risques à court et moyen terme, et de donner plus de temps pour effectuer des choix sociaux et économiques permettant d'atténuer le réchauffement. Mais il faut noter que les coûts et les avantages apportés par ces mesures risquent de ne pas être partagés équitablement entre les populations, pouvant même aggraver l'exposition au risque de certaines. Pour éviter cela, les efforts au niveau local doivent s'inscrire dans des efforts plus généraux au niveau global.



Fiche
4

L'OCÉAN AUSTRAL EST SOUS PRESSION

Nadia Améziane, Muséum national d'Histoire Naturelle

Les difficultés d'accès, dues notamment à des vents violents et à la présence de glace (icebergs, banquise), ont contribué au fait que l'océan Austral est resté longtemps mystérieux et inaccessible.

Ce n'est qu'en 2000 qu'il a été, baptisé officiellement « Océan Austral » par l'Organisation hydrographique internationale (OHI). L'océan Austral recouvre 35 millions de km² représentant environ 10% de l'océan mondial. Véritable « puits de CO₂ », cet océan en absorbe plusieurs milliards de tonnes chaque année. Il est parcouru par le Courant Circumpolaire Antarctique (CCA) : le courant océanique le plus puissant, le plus important et le plus rapide au monde. Long de 20 000 km, large de 200 à 100 km et pouvant atteindre des profondeurs allant jusqu'à 4000 m, il transporte 130 millions de m³ par seconde et a une vitesse de 0,9 à 3,7 km/h en surface.

Contrairement aux autres océans qui sont définis comme des étendues d'eau limitées par des continents, l'océan Austral est le seul à être défini comme une masse d'eau qui entoure un continent. Cet océan s'étend au sud du 60^{ème} parallèle sud et sur toute la circonférence du globe. Du fait de sa position géographique l'océan Austral joue un rôle majeur dans la circulation océanique globale, dans la régulation du climat, dans la régulation du cycle du carbone et dans la concentration en CO₂ de l'atmosphère. La température de ses eaux varie de -1,8°C près du continent à 3,5°C plus au large. Les températures très basses favorisent la dissolution d'oxygène qui s'y trouve à des taux plus élevés que dans les autres océans. Ainsi, la courantologie est complexe dans l'océan Austral.

1 LA CIRCULATION OCÉANIQUE AUSTRALE : DE QUEL PHÉNOMÈNE S'AGIT-IL ?

L'océan Austral est délimité au nord par un système de fronts et courants majoritaires appelé « la convergence Antarctique », et au sud par le continent Antarctique. Cette frontière nord est constituée du CCA, bordé au nord par le Front Subantarctique et au sud par le Front Polaire. Le CCA se déplace d'ouest en est. Ce n'est pas un courant uniforme, il est composé d'une série de fronts et de tour-

billons. Il forme une barrière physique peu perméable aux échanges thermiques entre les eaux chaudes plus au nord et les eaux très froides de l'océan Austral.

Ce courant est la principale source de formation des eaux profondes de l'océan mondial et brasse les eaux de trois océans Atlantique, Indien et Pacifique. Il absorbe les courants chauds et redistribue les eaux froides et denses (chargées en sel).

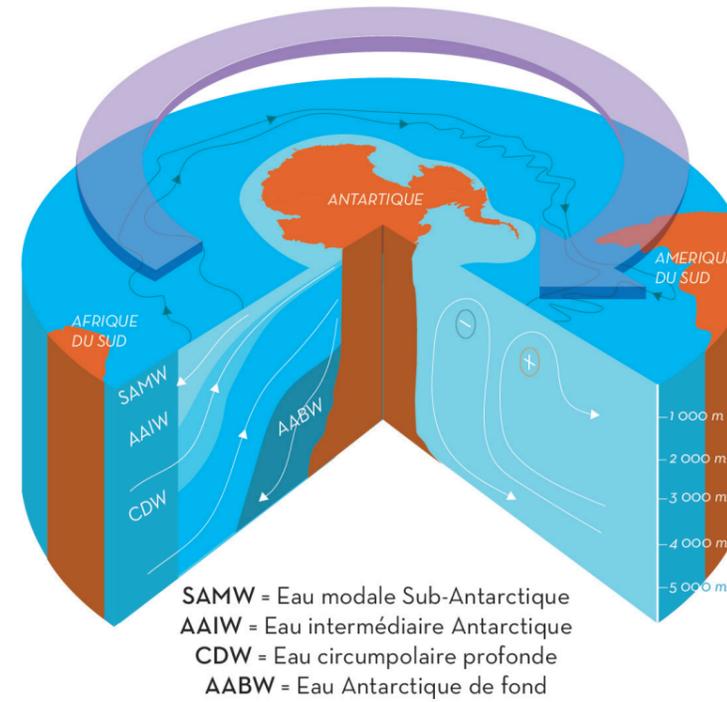


Figure 1 : la circulation océanique de l'océan Austral
Source: IPCC, SROCC, 2019. Chapitre 3

La circulation dite « de retournement » du CCA (qu'on peut observer sur la figure 1) a plusieurs actions :

- Elle joue un rôle dans le climat via le transfert de chaleur et de carbone avec l'atmosphère ;
- Elle joue un rôle dans l'oxygénation des eaux puisqu'elle favorise le développement d'éléments nutritifs dont une grande partie va alimenter une importante part de la production primaire des autres océans ;
- Elle impacte l'étendue et la concentration de la glace de mer ;
- Elle exerce une influence sur la structure et la fonction des écosystèmes pélagiques (dans la colonne d'eau) et benthiques (sur le fond) en déterminant l'habitat.

2 QUELLES SONT LES CAUSES ?

La température et le sel sont des moteurs de la circulation océanique australe (circulation thermohaline). Les vents jouent également un rôle capital dans la mise en place de cette circulation. Les marées et/ou l'interaction avec les reliefs sous-marins interviennent également dans la mise en place de la circulation océanique australe. L'ensemble de ces facteurs façonnent la circulation de retournement du CCA.

confiance élevé).

Ce réchauffement résulte de la circulation de retournement et du brassage de la partie supérieure de l'océan (degré de confiance élevé).

En revanche, à l'intérieur du CCA, l'élévation de température est principalement liée aux changements de flux air-mer.

3 LES CONSÉQUENCES SUR LES SYSTÈMES NATURELS

Le réchauffement de l'océan Austral n'est pas homogène suivant les zones. Ainsi, il est important dans les 2 000 premiers mètres de la tranche d'eau au niveau des latitudes comprises entre 40°S et 50°S.

En revanche, les eaux de surface situées au sud du CCA ne se sont réchauffées en moyenne que de 0,02°C par décennie, la tendance globale de la température de surface de la mer étant de 0,08°C depuis 1950 (degré de

La salinité est le déterminant dominant de la densité de l'océan Austral et exerce un contrôle important sur la circulation, le brassage et la stratification des eaux. Les changements dans la salinité sont induits par les apports d'eaux douces rejetées dans l'océan et/ou par le relargage du sel lors de la prise en glace de l'eau de mer.

Les changements de salinité observés entre 1950 et 2010 indiquent un adoucissement persistant des eaux de surface sur l'ensemble de l'océan Austral (degré de confiance moyen). Par ailleurs, la capacité de l'océan Austral à absorber le CO₂ varie suivant les décennies.

Ces fluctuations sont liées aux changements de régimes de vent et de température. Actuellement, le puits de CO₂ a tendance à augmenter.

Au cours des dernières décennies, les vents d'ouest ont augmenté dans l'océan Austral. Cependant, rien n'indique que cette augmentation ait modifié le transport du CCA dont la valeur moyenne annuelle semble être stable (degré de confiance moyen).

De plus, l'exportation du volume d'eau de fond Antarctique vers les autres océans a diminué (degré de confiance moyen).

La dynamique des écosystèmes marins de l'océan Austral est intimement liée au CCA et à ses systèmes frontaux, aux gyres subpolaires, à la saisonnalité polaire de la production primaire et à la couverture de glace.

Le krill, qui dépend fortement de la couverture de glace, joue un rôle majeur au sein du réseau trophique de l'océan Austral. Les baisses d'abondance signalées dans certains secteurs seraient épisodiques et actuellement aucune tendance à la décroissance continue de la biomasse du krill n'a été mise en évidence.

Il a néanmoins été observé un changement de la composition de ces populations (degré de confiance moyen).

De nombreux poissons antarctiques, benthiques (vivant sur le fond) et endémiques (vivant uniquement dans l'océan Austral) ont une tolérance thermique très faible en raison de leurs adaptations physiologiques à l'eau froide (protéine antigèle, perte de l'hémoglobine, etc) ce qui les rend vulnérables à une augmentation de température.

Ainsi, le poisson pélagique *Pleuragramma antarcticum* par exemple, proie importante dans certaines régions de l'océan Austral, a un cycle de vie qui dépend des glaces. La légine est un poisson important pour les pêcheries australes. Il n'existe, à ce jour, aucune preuve des effets du changement climatique sur les deux espèces de légine de l'océan Austral (degré de confiance moyen).

La faune benthique est composée de nombreuses espèces endémiques. La majorité de ces espèces sont des suspensivores filtreurs (se nourrissent de plancton).

Les communautés situées dans des habitats d'eau peu profonde recouverts par la glace sont principalement composées d'invertébrés adaptés à l'obscurité.

La faune benthique va dépendre principalement des conditions de glace (banquise, icebergs), de la disponibilité de la production primaire et de la profondeur de la couche mélangée.

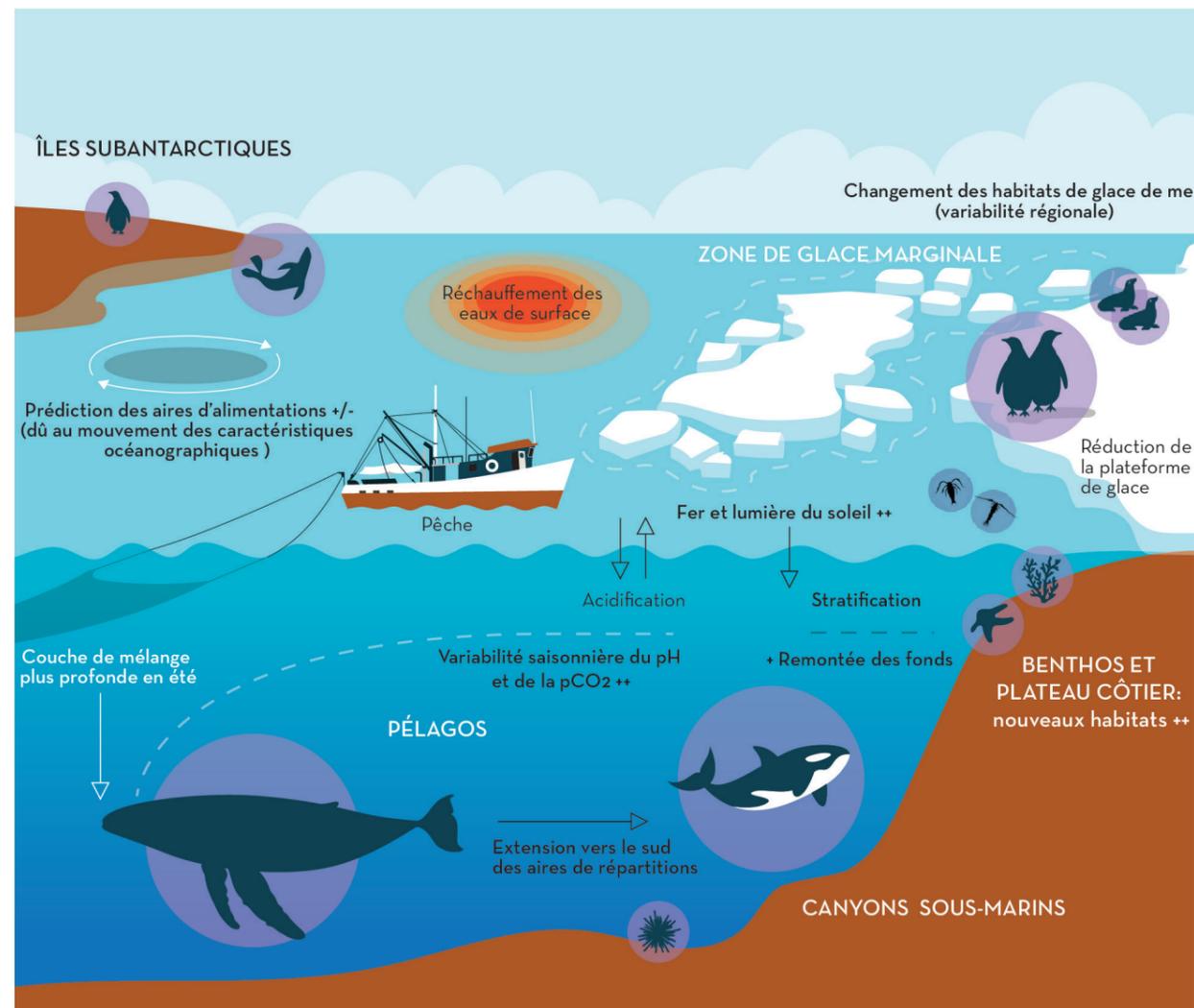


Figure 2 : Schéma synthétique des processus majeurs du changement global impactant les différents écosystèmes de l'océan Austral.

Les oiseaux et mammifères marins, sont toutes des espèces migratrices qui viennent dans l'océan Austral soit pour se reproduire, soit pour s'alimenter. Ces animaux sont fortement dépendants des conditions de glace et de la disponibilité de nourriture (degré de confiance élevé). Ainsi, les paramètres biologiques (succès de reproduction, mortalité, fécondité), les traits de vie, les caractéristiques morphologiques, physiologiques et comportementales des principaux prédateurs de l'océan Austral sont en train de changer à la suite du changement climatique (degré de confiance élevé).

4 QUE PEUT-IL SE PASSER À TERME ?

La modélisation indique que les tendances observées en matière de réchauffement de l'océan Austral se poursuivront, entraînant un réchauffement de 1° à 3°C d'ici 2100, principalement dans les couches supérieures de l'océan.

Les masses d'eau de la haute mer deviennent également beaucoup plus douces (diminution de la salinité d'environ 0,1 unité) avec une augmentation globale de la stratification et de la profondeur de la couche mélangée (modifications du modèle robuste, degré de confiance faible des valeurs). La formation et les exportations d'eau de fond antarctique devraient continuer à diminuer en raison du réchauffement et de l'adoucissement des eaux de surface près du continent (degré de confiance faible).

Les modèles prévoient que l'océan Austral augmentera sa capacité d'absorption du CO₂ à l'horizon 2100 avec une absorption qui cessera vers 2070. Cet arrêt est lié à la réduction de la capacité tampon et à la hausse des taux de remontée des eaux profondes circumpolaires (degré de confiance moyen).

Les projections soulignent le potentiel renforcement continu des vents d'ouest couplé au réchauffement et à l'augmentation des apports en eau douce lesquels résultent à la fois de l'augmentation des précipitations dans l'océan Austral et la fonte des glaces de l'Antarctique. Si les vents d'ouest continuent à augmenter, le champ de tourbillons continuera probablement de croître en intensité, ce qui pourrait avoir des conséquences sur la circulation de retournement de la partie supérieure de l'océan ainsi que sur le transport de la chaleur, du carbone, de l'oxygène et des nutriments.

Avec les changements futurs, la population de krill antarctique sera sujette à de nouvelles modifications (degré de confiance moyen). Ainsi, la répartition spatiale du krill antarctique devrait changer et sa biomasse décroître et

ce, en raison des modifications des conditions optimales pour sa croissance et son recrutement (température, couverture de glace, acidification). Cette décroissance de la biomasse du krill sera compensée par une augmentation de la biomasse des salpes (tuniciers planctoniques) lesquelles n'ont pas de prédateurs dans l'océan Austral.

La hausse des températures va affecter physiologiquement les poissons benthiques antarctiques lesquels se déplaceront dans un premier temps dans des habitats marginaux (degré de confiance faible). Les baisses d'abondance du poisson *Pleuragramma antarcticum* dans certaines parties de la péninsule antarctique occidentale pourraient avoir des conséquences sur les réseaux trophiques associés (degré de confiance faible). La légine antarctique, quant à elle, pourrait être confrontée à une réduction de son habitat et à une concurrence potentielle avec l'autre espèce de légine laquelle verrait son aire de distribution déplacée (degré de confiance très faible).

Le nombre d'introductions d'espèces exotiques devrait augmenter (degré de confiance très faible), cependant le CCA devrait continuer de jouer un rôle essentiel de barrière biogéographique pour les espèces vivant en pleine mer.

À la suite des modifications de température, de couverture de glace, de l'affouillement des icebergs, 79% des espèces d'invertébrés benthiques endémiques de l'Antarctique feront face à une réduction de leur habitat (degré de confiance faible). Les réductions prévues du nombre d'espèces seront les plus ou moins prononcées suivant les régions antarctiques.

Les oiseaux et mammifères marins continueront d'être impactés par le changement climatique, les modifications de la couverture de glace et la disponibilité de nourriture.

5 LES CONSÉQUENCES SOCIO-ÉCONOMIQUES

La vulnérabilité de l'océan Austral risque de perturber gravement la circulation globale de l'Océan, avec un impact biologique et économique important. L'érosion de la biodiversité et la surexploitation de la ressource (notamment le krill) doivent amener à des propositions de conservation, et ce en intégrant les facteurs géopolitiques et socio-économiques.

Fiche

5

VERS DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES

Corinne Bussi-Copin, Institut Océanographique, Fondation Albert 1er, Prince de Monaco

Le changement climatique global observé depuis plus d'un siècle entraîne une modification des échanges énergétiques entre l'océan et l'atmosphère. Les événements météorologiques classiques gagnent en intensité et provoquent des impacts socio-environnementaux et économiques catastrophiques.

Ces événements extrêmes historiquement rares devraient devenir de plus en plus répandus au cours de ce siècle quelques soient les scénarios. La fréquence croissante de ces événements associée à la vulnérabilité des écosystèmes et des communautés humaines, déclencheront des réactions en cascade sur les systèmes environnementaux et sur les sociétés.

Les vagues de chaleur en mer augmenteront très probablement en fréquence, en durée et en intensité, affectant les organismes marins et les écosystèmes ainsi que les pêcheries. Le nombre de cyclones de catégorie 4 et 5 augmentera, provoquant une élévation du niveau de la mer temporaire qui, combinée à d'autres effets, entraînera des inondations catastrophiques.

1 LES VAGUES DE CHALEUR OCÉANIQUES : DE QUOI S'AGIT-IL ?

Comme sur le continent, des vagues de chaleur affectent l'océan dans les régions tropicales. Elles se caractérisent par une observation de températures anormalement élevées pendant plusieurs jours consécutifs dans une région assez étendue créant ainsi de grandes poches d'eau anormalement chaudes.

L'augmentation durable de la température de l'eau sur les premiers 60 m provoque une évaporation intense et des transferts d'humidité de l'océan vers l'atmosphère. Ce transfert est à son maximum lorsque les eaux de surface atteignent 28 à 29 °C et provoque des instabilités comme les typhons, ouragans et cyclones.

Les cyclones tropicaux, typhon ou ouragan sont des phénomènes tourbillonnaires qui prennent place dans l'atmosphère. Ces phénomènes tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens contraire dans l'hémisphère nord. Ils s'étendent

sur 500 à 1 000 km avec des vents dont la vitesse est supérieure ou égale à 64 nœuds, c'est-à-dire 118 km/h (soit une force 12 sur l'échelle de Beaufort) et entraînent d'intenses précipitations. En revanche, leur centre appelé "œil du cyclone", d'un diamètre généralement de 30 à 60 km (parfois jusqu'à 150 km) est une zone d'accalmie (pas de pluie, vent faible). Le nom de l'évènement change en fonction de sa zone de passage : le typhon sévit dans le Pacifique Nord-Ouest, l'ouragan en Atlantique Nord et dans le Pacifique Nord-Est, et le cyclone dans l'océan Indien et le Pacifique Sud.

2 ÉVOLUTION DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES DEPUIS 100 ANS

La fréquence des vagues de chaleur a très probablement doublé depuis le début des années 1980. En effet, des vagues de chaleurs se sont produites dans tous les bassins océaniques au cours des dernières décennies. Comparativement à la période 1925-1954, 50% de jours de présence supplémentaires de vagues de chaleurs océaniques ont

été enregistrés depuis 1987. Et en 2015 et 2016, 1/4 de la surface de la mer a subi des événements plus longs et plus intenses. À l'échelle mondiale, environ 90% des vagues de chaleur océaniques observées sont imputables à l'Homme et certaines sont sans précédent par rapport aux conditions préindustrielles (degré de confiance élevé).

Par ailleurs, la saison cyclonique 2017 en Atlantique Nord fut la plus active des 100 dernières années avec d'importants dommages écologiques et sociétales (degré de confiance élevé). L'augmentation de fréquence des cyclones à l'échelle mondiale reste peu probable (degré de confiance faible), mais les cyclones tropicaux auront probablement une intensité légèrement supérieure avec un taux de précipitations plus élevé et une augmentation de la proportion de cyclones tropicaux de catégorie 4 et 5 (degré de confiance moyen).

Les vagues de chaleur sont des phénomènes climatiques et océanographiques nommés Oscillation australe et El Niño. Combinés, ils forment L'ENSO (pour « El Niño Southern Oscillation »). Le phénomène El Niño qui se caractérise par une anomalie thermique des eaux équatoriales de surface (premières dizaines de mètres) prend place au centre de l'océan Pacifique. El Niño est connu pour provoquer des catastrophes naturelles (sécheresses, inondations, cyclones tropicaux) et affecter de manière non négligeable le niveau de la mer à l'échelle de la planète.

Ces événements extrêmes provoquent des dégâts sur les écosystèmes marins et côtiers et impactent les commu-

nautés associées (degré de confiance très élevé). Sur les 50 dernières années, les événements majeurs concernant les dégâts causés par des cyclones :

1) **1965** : plus de 30 000 personnes touchées pour 2 500 milliards de dollars US de dégâts.

2) **1979** : 30 000 personnes touchées pour 600 milliards de dollars US de dégâts.

3) **1995** : plus de 30 000 personnes touchées pour 500 milliards de dollars US de dégâts.

4) **2007** : plus de 35 000 personnes touchées pour moins de 500 milliards de dollars US de dégâts.

5) **2015** : 30 000 personnes touchées pour 300 milliards de dollars US de dégâts.

On peut imaginer que si moins de personnes sont touchées lors d'événements puissants, cela est dû à la gestion des alertes et à la mise en place de plans d'évacuation.

Cependant, cela affecte fortement les écosystèmes marins. Des effets néfastes et potentiellement irréversibles sur les récifs coralliens et sur d'autres écosystèmes marins sont déjà constatés. Le phénomène de blanchissement, associé à une mortalité massive des coraux et à une grande échelle géographique, a augmenté depuis 1997-1998, dégradant la biodiversité des récifs coralliens pour un écosystème dominé par les algues (degré de confiance élevé).



Les herbiers de phanérogames (plantes marines) et les forêts de kelp (algues géantes) ont vu une diminution de leur croissance, voire une déforestation généralisée. Certaines zones ont perdu près de 40% de leur surface à la suite de vagues de chaleur (degré de confiance moyen).

La régression de la mangrove a été observée au cours des 50 dernières années, (degré de confiance élevé).

La perte des écosystèmes côtiers végétalisés augmenterait le CO² atmosphérique de 0,15-5,35 gigatonnes/an, autant de dioxyde de carbone qui ne serait pas stocké (degré de confiance élevé).

Les populations côtières exploitant les ressources marines de ces écosystèmes sont économiquement impactées. En effet, l'association des cyclones à des précipitations

ou des vagues de grandes ampleurs provoquera des inondations des zones littorales. L'élévation du niveau de la mer combinée à des ondes de tempêtes plus élevées et associées aux cyclones tropicaux sera extrême (degré de confiance élevé).

Les événements extrêmes historiquement rares devraient devenir de plus en plus répandus au cours de ce siècle quelques soient les scénarios (degré de confiance élevé). Un événement arrivant une fois sur 100 jours aux niveaux préindustriels devrait intervenir tous les 6 jours pour le scénario à 1,5°C et tous les 3 jours à un réchauffement de 3,5°C (degré de confiance moyen). La fréquence croissante de ces événements associée à la vulnérabilité des écosystèmes et des communautés humaines provoquera des impacts en cascade, dont de sévères inondations (degré de confiance élevé).



3 QUE PEUT-IL SE PASSER À TERME ?

L'augmentation de la fréquence (degré de confiance moyen), de la durée et de l'intensité des vagues de chaleur en mer (degré de confiance élevé) continuera d'impacter les écosystèmes marins tropicaux mais aussi ceux des plus hautes latitudes. Globalement, la fréquence des vagues de chaleurs marines va très probablement augmenter d'un facteur 20 (sous le scénario RCP2.6) ou 50 (sous le scénario RCP8.5) à l'horizon 2100. Ces augmentations de fréquence prendront place dans l'océan Arctique et au niveau des tropiques (degré de confiance moyen).

Même s'il n'y pas de corrélation entre la sévérité des événements et les impacts observés, tous les organismes marins subiront de grandes pertes et les communautés seront modifiées, tout comme les processus biogéochimiques. La désoxygénation, l'acidification et la modification de l'apport en éléments nutritifs devraient accentuer la diminution de biodiversité (richesse des espèces et hétérogénéité spatiale) dans les écosystèmes côtiers (degré de confiance moyen). Les écosystèmes seront au-delà de leurs limites de résilience, notamment les espèces à mobilité réduite, tels que les coraux constructeurs de récif (degré de confiance élevé). Les espèces mobiles comme les poissons se déplaceront des régions tropicales vers les régions tempérées, affectant les ressources alimentaires des populations et les activités économiques comme les pêcheries (degré de confiance moyen).

Quelles seront les conséquences socio-économiques ?

Le rôle de l'océan dans la régulation du climat, dans l'approvisionnement en ressources et pour le bien-être de l'Homme est indéniable mais une large gamme de biens et services écologiques dérivés des écosystèmes marins sont gravement touchés par les récentes vagues de chaleur et autres événements extrêmes (degré de confiance élevé). La biodiversité et les fonctions écosystémiques sont déjà touchés (degré de confiance moyen). La qualité et la quantité des zones touristiques sont réduites, générant des baisses d'activités pour certaines régions.

Le cycle des éléments nutritifs est modifié, les flux de carbone influencent la production primaire (degré de confiance élevée) ce qui impactera la biomasse dans les zones profondes (degré de confiance moyen). La séquestration du carbone se traduit La séquestration du carbone par les écosystèmes sera

réduite. La dégradation du bon état de santé de l'océan aura des impacts négatifs sur le savoir et les cultures autochtones (degré de confiance moyen). De plus, les événements extrêmes interagissent avec la vulnérabilité des communautés (degré de confiance élevé).

Le rapport entre les coûts d'investissement en réduction des risques et ceux de réparation des dommages engendrés par les événements extrêmes varie. Investir dans des stratégies d'évitement (par exemple, une planification approfondie de l'utilisation des sols) et la préparation (par exemple, des systèmes d'alerte) est très utile, et est probablement moins coûteux que les impacts d'événements extrêmes et de la restauration après sinistre (degré de confiance moyen).

Comment faire face aux impacts des événements extrêmes ?

L'incertitude entourant la fréquence et les caractéristiques des cyclones tropicaux crée des retards pour la mise en œuvre de procédures d'alertes précoces et d'évacuations. Les problèmes de coordination entre les organisations d'intervention en cas de catastrophes persistent.

L'atténuation consiste à réduire le problème à la source :

- 1) Limiter le réchauffement climatique pour réduire l'intensité des vagues de chaleurs marines et des cyclones.
- 2) Maintenir la bonne santé des écosystèmes pour leur permettre de jouer leurs rôles de protection des côtes.

L'adaptation consiste à ajuster les aménagements et les populations aux nouveaux risques entraînés par la montée du niveau marin :

- 1) Construire des digues et des bâtiments surélevés qui protégeront les populations à court terme.
- 2) Prise d'initiatives plus radicales d'évacuation et de déplacement des populations à long terme, car la construction de protections sur le littoral augmente l'érosion côtière.

L'OCÉAN PERD DE L'OXYGÈNE

Michel Hignette, Union des Conservateurs d'Aquariums (UCA)

La désoxygénation (diminution de l'oxygène dissous) est un phénomène qui se produit quand la consommation d'oxygène dissous est supérieure à l'apport d'oxygène dans un milieu aquatique. Il s'ensuit un déficit en oxygène qui peut avoir de grandes conséquences sur les systèmes biologiques.

Les causes de la désoxygénation sont de deux natures. D'une part, le premier phénomène correspond à l'augmentation de la température qui réduit la solubilité de l'oxygène dans l'eau et favorise la stratification, ce qui diminue les échanges entre les différentes couches d'eau (les plus proches de la surface étant les mieux oxygénées par des échanges gazeux avec l'atmosphère). D'autre part, le deuxième phénomène correspond aux apports excessifs d'azote et de phosphore dans le milieu marin (provenant des stations d'épuration ou de l'agriculture) qui favorisent l'eutrophisation et entraîne notamment le développement massif de microalgues.

En présence de sels minéraux trop abondants, les algues planctoniques se multiplient rapidement et atteignent des concentrations telles que de nuit, en l'absence de photosynthèse, leur respiration appauvrit le milieu en oxygène.

1 LA PRISE EN COMPTE DE LA DÉSOXYGÉNATION DANS L'OCÉAN EST RÉCENTE

Seulement évoquée lors du rapport du GIEC de 2014, la désoxygénation est maintenant considérée comme l'une des trois problématiques concernant l'océan, avec le réchauffement climatique et l'acidification.

La valeur seuil généralement retenue pour définir la désoxygénation est de 60 micromoles/kg, soit environ 2 mg d'oxygène par litre d'eau.

En haute mer, la décomposition de la matière organique par des bactéries, consommatrices d'oxygène, appauvrit la colonne d'eau en oxygène au fur et à mesure que la profondeur augmente. En effet, l'absence de photosynthèse par manque de lumière et l'éloignement de la surface, où

les échanges avec l'atmosphère stabilisent la concentration en oxygène, ne permettent pas de compenser la consommation d'oxygène par les bactéries.

Par ailleurs, la circulation thermohaline se caractérise par des eaux froides riches en oxygène s'enfonçant à proximité des pôles et circulant en profondeur. Ainsi, en grande profondeur, cette circulation thermohaline rétablit une concentration en oxygène plus élevée. Il y a donc un minimum d'oxygène dans les eaux de profondeur intermédiaire (entre 100 et 1 000 m de profondeur). En milieu côtier, c'est l'eutrophisation qui est à l'origine de la désoxygénation.

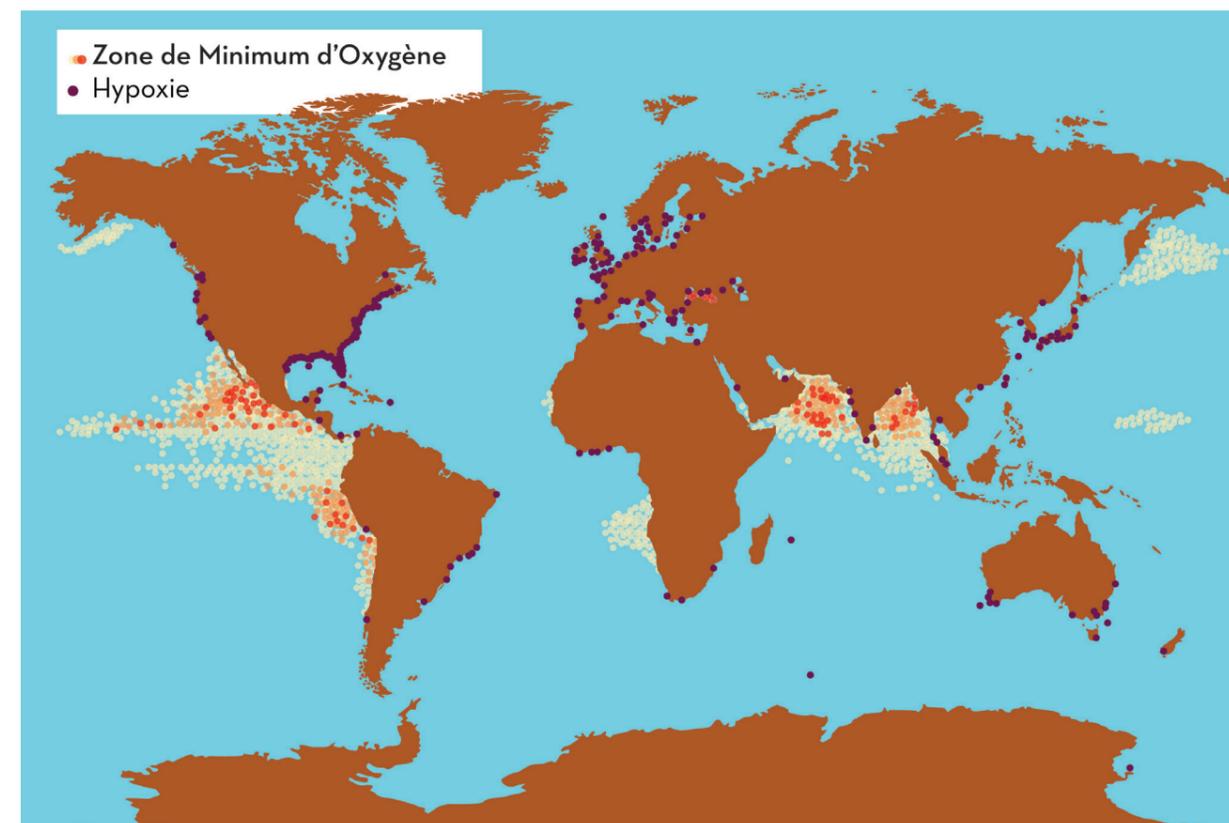
2 LES ZONES DE MINIMUM D'OXYGÈNE

Les zones de minimum d'oxygène qualifiées d'OMZs pour « Oxygen Minimum Zones », semblent avoir augmenté de manière très inquiétante récemment. Cependant, il se peut que les améliorations dans les collectes de mesures

puissent expliquer, en partie, cette augmentation apparente.

Depuis 1960, en haute mer, c'est une augmentation de 4,5 millions de km² qui a été constatée et de l'ordre de 500 sites côtiers ou estuariens, déficitaires en oxygène, ont été identifiés.

L'océan perd actuellement de l'ordre d'une gigatonne d'oxygène dissous par an. De manière globale, une diminution de 3 à 4% de l'oxygène dissous dans l'océan est envisagée d'ici 2100 mais avec de grandes variations locales, notamment en milieu tropical pour lesquelles il y a de fortes incertitudes (degré de confiance moyen).



L'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire publié par les Nations Unis en 2005 indique que le rejet de composés azotés dans l'océan a augmenté de 80% entre 1860 et 1990. Pour les plans d'eau côtiers, des augmentations d'un facteur 100 peuvent être constatés.

Au cours des 50 dernières années, la surface des OMZs a augmenté de 4,5 millions de km². L'océan global perd maintenant approximativement 1 gigatonne d'oxygène chaque année (Keeling and Garcia, 2002)

Les upwellings d'eaux pauvres en oxygène peuvent causer des événements de mortalités importants pour les poissons mais permettent également la remontée de nutriments qui sont essentiels à la production halieutique.

Plus de 500 plans d'eau côtiers ont maintenant des concentrations d'oxygène dissous inférieures à 2,2 mg/L (Diaz and Rosenberg 2002 et Diaz mise à jour non publié)

La mer Baltique a la plus grande zone côtière hypoxique. En 2011, la zone avec des concentrations d'oxygène < 2 mg/L avait une étendue de 80 000 km² (Carstensen et al. 2014)

Figure 1: Zones de minimum d'oxygène (rouge) et zones d'hypoxie côtière (en violet) dans l'océan mondial
Source: « The Ocean is losing its breath. Declining oxygen in the world's ocean and coastal waters », IOC-UNESCO, 2018

3 LES CONSÉQUENCES SUR LES SYSTÈMES NATURELS

Dans les zones où la concentration en oxygène dissous est déjà faible, une légère diminution supplémentaire peut conduire à une perte de biodiversité, une modification des

cycles géochimiques et une diminution de la productivité des écosystème, ainsi que de la répartition géographique des espèces.

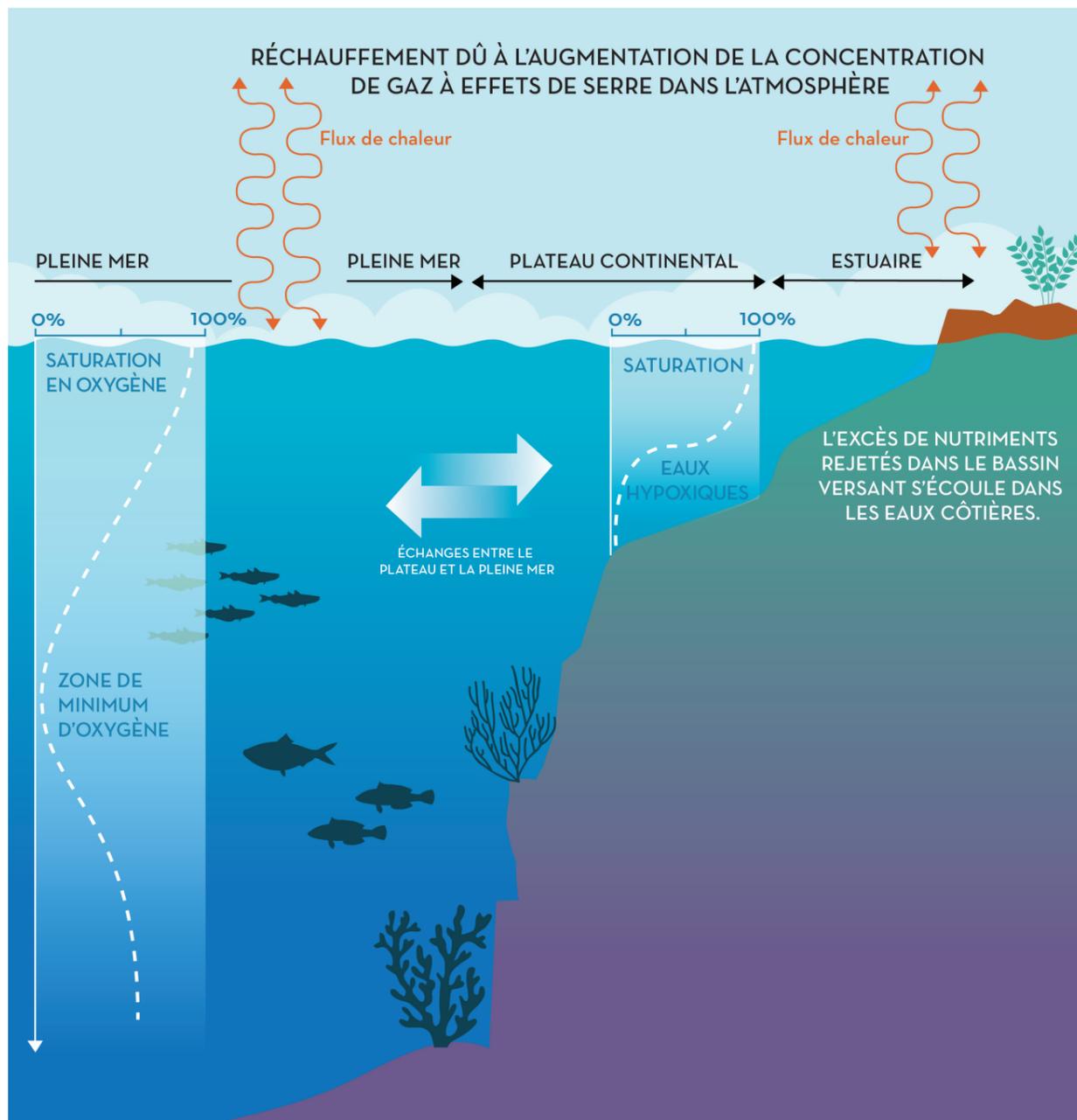


Figure 2: La désoxygénation dans l'océan: les causes et les conséquences

Source: « The Ocean is losing its breath. Declining oxygen in the world's ocean and coastal waters », IOC-UNESCO, 2018 (modifié)

4 LES CONSÉQUENCES SOCIO-ÉCONOMIQUES

Les conséquences socio-économiques se ressentent déjà dans le monde de la pêche et de l'aquaculture.

Les tonnages capturés par les flottilles de pêche ainsi que la composition spécifique des prises sont déjà impactés par le réchauffement climatique, la désoxygénation et les modifications de la production primaire (plancton) (degré

de confiance élevé). Ces facteurs jouent un rôle dans la croissance, la reproduction et la survie des stocks de poissons. Ils augmentent l'apparition de maladies, notamment en aquaculture où les animaux confinés ne peuvent s'échapper vers des zones plus oxygénées. Les élevages de coquillages sont très sensibles à ces modifications ainsi qu'à l'acidification.

Des pêcheurs sont déjà obligés de modifier leurs zones de pêche, avec des conséquences sur la durée des sorties en mer et la consommation de carburant.

Ce sont les zones tropicales qui seront les plus impactées

prochainement.

Pour l'aquaculture, la recherche de sites favorables, intégrant les modifications à venir, est un enjeu considérable alors que l'on assiste à une demande croissante pour les produits de la mer et que les tonnages issus de la pêche stagnent, voire régressent.

La faible disponibilité de ces sites favorables constitue un frein au développement de l'aquaculture car le littoral est très convoité pour d'autres activités (tourisme...).

5 LES ÉVENTUELS EFFETS CUMULATIFS SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

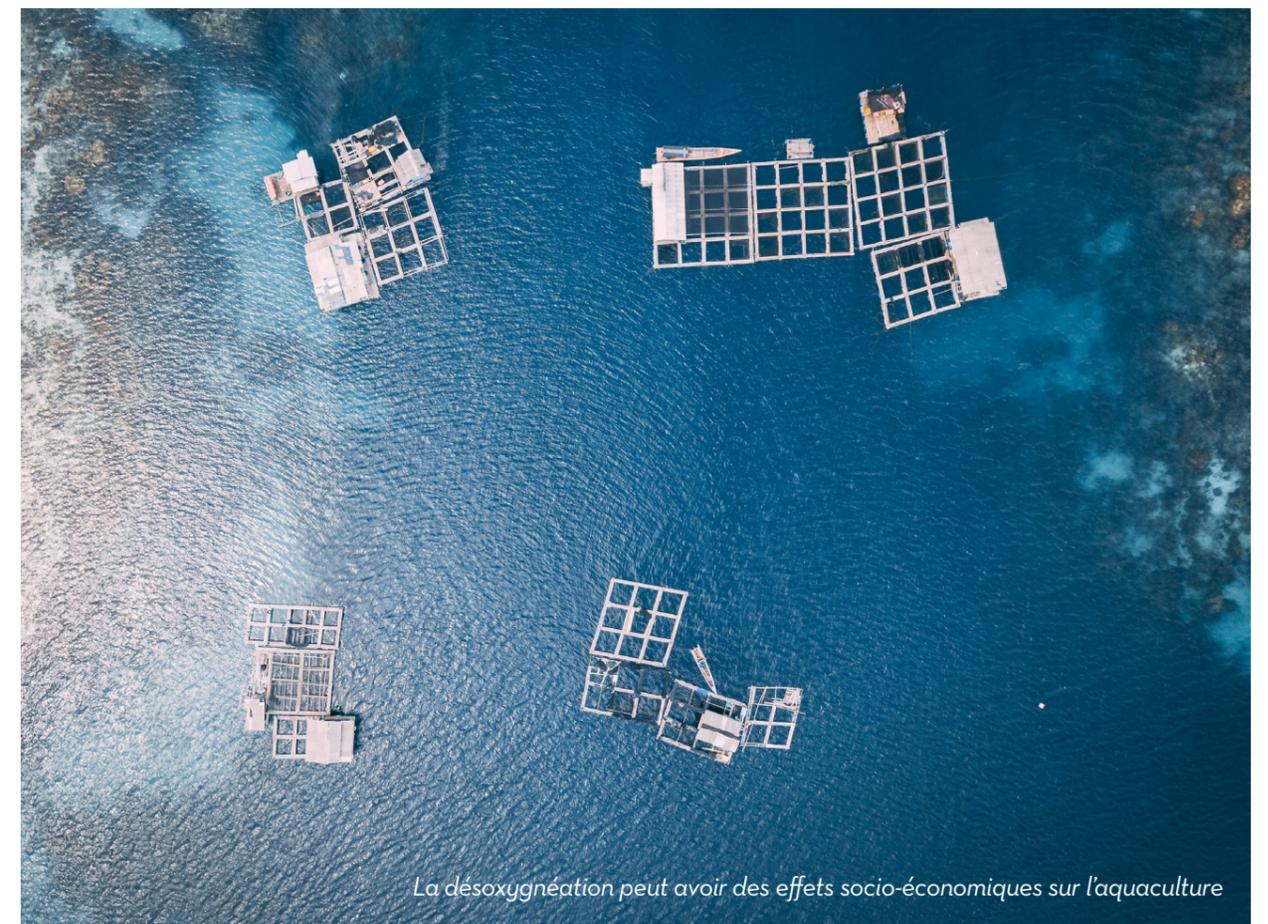
La désoxygénation pourrait aussi avoir un effet sur le changement climatique par une contribution à l'effet de serre, via une modification du cycle de l'azote. En effet, lorsque la concentration en oxygène dissous est insuffisante pour assurer la respiration en aérobie, certains micro-organismes pratiquent la dénitrification pour couvrir leurs besoins énergétiques. Cette transformation des nitrates en azote

gazeux inerte peut malheureusement produire un intermédiaire : le protoxyde d'azote. Ce dernier est un gaz à effet de serre très puissant, dont l'effet est 300 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone et qui, de plus, contribue à la destruction de la couche d'ozone. Un « cercle vicieux » pourrait donc se mettre en place : le réchauffement de l'océan entraînerait, via la désoxygénation, l'émission d'un gaz contributeur au réchauffement climatique.

Le trio « infernal » : réchauffement, désoxygénation et acidification, a ainsi une même origine anthropique.

6 QUELLES SOLUTIONS POUR L'AVENIR ?

De manière globale, pour que l'océan puisse continuer à contribuer au bien-être de l'humanité par les services qu'il rend, il faut diminuer drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et les rejets d'azote et de phosphore issus des stations de traitement des eaux (quand elles existent...) et de l'agriculture peu raisonnée.



La désoxygénation peut avoir des effets socio-économiques sur l'aquaculture

OCÉAN ET CHANGEMENT CLIMATIQUE: PANORAMA DES CONSÉQUENCES

AUTEURS:
CORINNE BUSSI-COPIN,
CÉLINE LIRET, EMILIE ETIENNE

AUGMENTATION DES ÉMISSIONS DE GES* DANS L'ATMOSPHÈRE & AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE ATMOSPHÉRIQUE

CONSÉQUENCES PHYSICO-CHIMIQUES

- **Augmentation de la fonte des glaces et glaciers**
 - Élévation du niveau de la mer
 - Modification des courants marins
- **Augmentation de l'acidification de l'océan**
- **Augmentation des températures de l'océan**
 - Diminution de la banquise
 - Elargissement des zones faiblement oxygénées
 - Modification des courants marins
 - Elévation du niveau de la mer
 - Augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur océaniques, et augmentation de l'intensité des cyclones

CONSÉQUENCES SUR LES ÉCOSYSTÈMES

- **Altération des services écosystémiques**
- **Déplacement des aires de répartition de certaines espèces de poissons**
- **Modification de la composition des communautés**
- **Destruction des écosystèmes de récifs coralliens**
- **Perturbation du cycle du carbone - Habitats profonds**
- **Modification de la biomasse marine et de la chaîne alimentaire**
- **Réduction de la production primaire marine**
- **Impacts sur d'autres espèces que les poissons**
- **Contribution à l'érosion de la biodiversité**

CONSÉQUENCES SOCIO-ÉCONOMIQUES

CONSÉQUENCES SUR LES ACTIVITÉS HUMAINES

- **Perte de rendements pour les secteurs de la pêche et de l'aquaculture**
- **Perte de territoire due aux inondations et/ou aux sécheresses**

CONSÉQUENCES SUR LES POPULATIONS HUMAINES

- **Augmentation du stress hydrique**
- **Augmentation des inégalités**
- **Augmentation de l'insécurité alimentaire**
- **Augmentation de l'insécurité physique face aux événements extrêmes**
- **Augmentation des migrations de populations**
- **Augmentation des risques sanitaires**

* Les principaux gaz responsables de l'effet de serre, dont les émissions sont encadrées par le protocole de Kyoto, sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), et les gaz fluorés (HFC, PFC et SF₆).

RESSOURCES

RAPPORTS SCIENTIFIQUES :

• Rapport spécial du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat sur l'Océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique, septembre 2019

OUVRAGES

- Euzen A., Gaill F., Lacroix D. et CURY P. (coordination scientifique), L'Océan à découvert, CNRS éditions, Collection 'A découvert', 2017, 322 p.
- Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., Feng, M. et al., « Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services », Nature Climate Change, 9, 2019, pp. 306-312.
- Breitburg, D., Grégoire, M. and Isensee, K. (eds.), Global Ocean Oxygen Network, « The ocean is losing its breath: Declining oxygen in the world's ocean and coastal waters », IOC-UNESCO. IOC Technical Series, No 137, 2018, 39 pp.
- Levin, L.A., "Manifestation, Drivers, and Emergence of Open Ocean Deoxygenation", Annual Review of Marine Science, Vol.10, January 2018, pp. 229-260.
- Schmidtko S., Stramma L., and Visbeck M., « Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades », Nature international journal of science, No 542, February 2017, pp. 335-339.
- Smale, D. A., Wernberg, T., Oliver, E. C., Thomsen, M., Harvey, B. P., Straub, S. C., Feng, M. et al., « Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services », Nature Climate Change, 9, 2019, pp. 306-312.
- Zupan M., Bulleri F., Julian E, Fraschetti S., Guidetti P., Garcia-Rubies A., Sostres M., Asnaghi V., Caro A., Deudero S., Goñi R., Guarneri G., Guilhaumon F., Kersting D., Kokkali et al., « How good is your marine protected area at curbing threats ? », Biological conservation, Vol. 221, May 2018, pp. 237-245

RESSOURCES DE LA PLATEFORME OCÉAN ET CLIMAT

Fiches scientifiques, 2015

http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2015/10/151022_FichesScientifiques_O4.pdf

Fiches scientifiques 2016

http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2016/10/internet-161024_FichesScientifiques_Oct2016_BD_ppp.pdf

[Fiches pédagogiques, 2016](#)

SITOGRAPHIE :

Météo France, Phénomènes météo : les cyclones [en ligne]

<http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/phenomenes-meteo/les-cyclones> (consulté le 13 juin 2019)

Réseau de référence des observations marégraphiques, Enso - El Niño - La Niña, [en ligne]

<http://refmar.shom.fr/fr/applications/maregraphiques/etudes-meteo-oceaniques/enso-el-nino-la-nina> (consulté le 13 juin 2019)

Organisation des Nations Unies, Convention sur la diversité biologique, [en ligne]

<https://www.un.org/fr/events/biodiversityday/convention.shtml> (consulté en mai 2019).

Organisation des Nations Unies, Objectifs de développement durable sur le site des Nations Unies [en ligne]

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/> (consulté en mai 2019)



ocean-climate.org

Avec la participation de :



Institut
océanographique
Fondation Albert I^{er}, Prince de Monaco



Avec le soutien de :

