


OCÉANS
CONNECTÉS
Le média des sciences de la mer

A large, reflective sphere, possibly a glass ball, sits on a beach at sunset. The sphere is highly reflective, mirroring the sunset sky and the ocean. Inside the sphere, a sea turtle is visible, swimming in the water. The scene is bathed in the warm, golden light of the setting sun, with the sky transitioning from orange to blue. The sphere is positioned in the center of the frame, and its reflection is visible in the wet sand and shallow water in the foreground.

L'océan
ORCHESTRE
DU CLIMAT

gRANd FORMAT n°01



www.oceansconnectes.org

ÉDITO



La science ne vaut que si elle est partagée!

Quelle fierté et quel bonheur pour notre équipe de vous présenter ce 8 juin, notre premier grand format à l'occasion de la Journée Mondiale des Océans ! Cette édition est une grande nouveauté pour notre jeune média qui, il y a trois ans, a osé ouvrir un nouvel espace d'informations. Un espace pour que les scientifiques de la mer puissent enfin exposer et expliquer collectivement les actualités de leurs projets en soulignant les enjeux qu'ils représentent pour la société.

En 2020 pourtant, la pandémie de Covid-19 entraînait une violente méfiance envers la communauté scientifique. Nous lui demandions une solution miracle pour sortir en urgence d'un état de chaos généralisé, alors qu'elle se trouvait démunie face à un virus méconnu. Pressés de devoir accorder à la science le temps inhérent et nécessaire à son fonctionnement, beaucoup se sont tournés vers des jugements intuitifs ou purement subjectifs, que l'on sait partager aisément par écrans interposés.

Etienne Klein* protestait, « brandir son non-savoir pour délivrer à la cantonade toutes sortes d'injonctions, telle est la forme la plus manifeste du narcissisme contemporain ».

Mais la révolution numérique de ce XXI^{ème} siècle est là. Elle nous plonge dans un flux médiatique si intense et dans une cacophonie d'informations.

Il est urgent de redonner à chacun le temps de nourrir les réflexions et les débats, par une lecture de la science qui décortique les notions, décrypte les faits et les chiffres, et détricote les mauvaises idées.

Notre conviction est que la science doit ainsi être mise à portée de tous, en particulier celle des océans qui souffrent de nos activités humaines.

La Journée Mondiale des Océans 2024 portée par les Nations Unies est précisément tournée vers la nécessité d'un « renouvellement en profondeur de l'action ». Elle vient nous rappeler l'urgence de changer notre rapport à l'océan, les efforts déployés jusqu'à présent n'ayant fait que traiter des problèmes en surface.

Le premier dossier d'**océans connectés** participe de cette dynamique enclenchée par les Nations Unies. Constitué de 80 pages, il éclaire le fonctionnement des océans, piliers du système climatique. Ce format nouveau s'inscrit dans une volonté de renouveler la coopération médias-science-société nécessaire à la résolution des défis sociaux, économiques et environnementaux de la prochaine décennie.

C'est un pari osé, mais indispensable. Comme une nouvelle pierre à l'édifice de la construction d'une culture scientifique commune et partagée des océans. C'est un prémisses à notre action commune en faveur de leur préservation et de leur protection.

Carole Saout-Grit

* « Le goût du vrai », Etienne Klein - Collection Tracts (n° 17), Gallimard, juillet 2020

RÉDACTION

Fondatrice et directrice de la publication

Carole Saout-Grit
carole@oceansconnectes.org

Équipe de rédaction

Laurie Henry
Marion Durand
Maud Lénée-Corrèze
Marguerite Castel

Secrétaire de Rédaction

Marguerite Castel

Traduction

ACOPS
www.acops.org.uk

Comité éditorial

Sabrina Speich
Pascale Lherminier
Marie-Noëlle Houssais
Catherine Jeandel
Eléna Masferrer
Cécile Gruet
Antoine Cousot
Blandine Lheveder
Xavier Bougeard
Youna LBL Lyons

Photographes

Marion Durand
Maud Lénée-Corrèze
Marguerite Castel

Conception graphique et mise en page



Nantes

Logo et graphisme océans connectés

Lionel Le Guen, Mascara Design
www.mascaradesign.com

CONTACT

océans connectés

10 rue Mermoz
56860 Séné
+33(0)6 30 33 81 63
contact@oceansconnectes.org
www.oceansconnectes.org

Édité par océans connectés

SASU au capital social de 1000€ RCS:
Vannes B 893 694 026
SIRET : 89369402600012

Commission paritaire

1123 X 95024

océans connectés est **soutenu par le Ministère de la Culture** pour la diffusion de la culture scientifique et technique

Soutenu par



MINISTÈRE DE LA CULTURE

Liberté
Égalité
Fraternité

océans connectés est un **projet contribuant à la décennie des sciences océaniques portée par l'UNESCO** pour la période 2021-2030



2021-2030 Décennie des Nations Unies pour les sciences océaniques au service du développement durable

CONTRIBUTEURS

Herlé Mercier

océanographe physicien,
directeur de recherche au CNRS,
chercheur au LOPS Ifremer Brest
France

Pascale Lherminier

océanographe physicienne,
chercheuse au LOPS Ifremer Brest
France

Sabrina Speich

océanographe physicienne et climatologue, professeure au département de Géosciences de l'École Normale Supérieure (ENS-PSL) et chercheuse au Laboratoire de météorologie dynamique de l'Institut Pierre-Simon Laplace (LMD-IPSL), France
co-présidente du groupe international OOPC-GOOS

Julie Deshayes

océanographe physicienne,
directrice de recherche au CNRS et climatologue
au LOCEAN Paris France

Karina von Schuckmann

océanographe physicienne,
spécialisée dans la surveillance du climat océanique à Mercator Ocean International, Toulouse France

PARTENAIRES

IFREMER

www.ifremer.fr



PLATEFORME OCEAN & CLIMAT

www.ocean-climate.org



RBR

rbr-global.com/fr/

RBR

SCIENCES PO RENNES

www.sciencespo-rennes.fr



PRESSE OCEAN

www.ouest-france.fr/presse-ocean/

Presse Ocean

ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE - PSL

www.ens.psl.eu



OCEANVOX

www.oceano-vox.com/fr/

OCEAN VOX

ACOPS

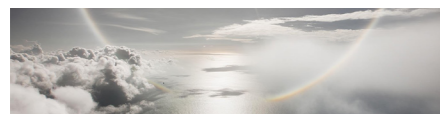
www.acops.org.uk

ACOPS

page 03

ÉDITO

par Carole Saout-Grit



page 08

CHAPITRE 1 CLIMAT & océan, comment ça marche ?

page 10

Le climat, une quête perpétuelle d'équilibre

par Marguerite Castel
et Carole Saout-Grit

page 13

océan atmosphère des échanges pour la vie

par Carole Saout-Grit

page 16

La grande boucle océanique, locomotive du climat

par Carole Saout-Grit



page 20

DOSSIER SPÉCIAL

CHAPITRE 2

OVIDE DEUX DÉCENNIES DE RECHERCHE OCÉANIQUE

page 22

ÉDITO

par Maud Lénée-Corrèze

page 24

UN OBSERVATOIRE INÉDIT POUR SURVEILLER L'ATLANTIQUE NORD

par Maud Lénée-Corrèze

page 28

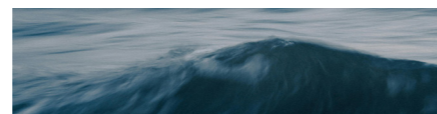
"IL NOUS FAUT DES DONNÉES SUR 100 ANS"

Interview de Herlé Mercier & Pascale
Lherminier, océanographes
propos recueillis par
Maud Lénée-Corrèze

page 32

LES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES D'OVIDE

par Maud Lénée-Corrèze



page 34

CHAPITRE 3

LES COURANTS MARINS, CHEFS D'ORCHESTRE DU CLIMAT

page 36

LES GRANDES DATES DE L'OBSERVATION DES COURANTS

par Carole Saout-Grit

page 38

L'océan AUSTRAL, GRAND MAÎTRE DES COURANTS MARINS AU PÔLE SUD

par Laurie Henry

page 42

La turbulence océanique : influence microscopique et impact majeur

par Laurie Henry



page 46

CHAPITRE 4

LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA CIRCULATION OCÉANIQUE

page 48

L'océan, première victime du changement climatique

par Marion Durand

page 51

La responsabilité de l'homme sans équivoque

par Marion Durand

page 53

Le réchauffement des océans et la fonte des glaciers menacent l'AMOC

par Marion Durand

page 55

"Le changement climatique pourrait dérégler la circulation océanique"

Interview de Julie Deshayes, océano-
graphe
propos recueillis par Marion Durand

page 59

CIRCULATION OCÉANIQUE : ET SI CE GRAND TAPIS ROULANT S'ARRÊTAIT?

par Marion Durand



page 62

CHAPITRE 5

LES SOLUTIONS D'AVENIR

page 64

UN SYSTÈME GLOBAL D'OBSERVATION DE L'OCÉAN

par Carole Saout-Grit

page 68

LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE POUR PRÉSERVER L'ÉQUILIBRE OCÉAN-CLIMAT

par Laurie Henry

page 71

LES CAMPAGNES D'OPPORTUNITÉ, UN COMPLÉMENT À LA RECHERCHE OCÉANIQUE

par Marion Durand

page 74

LISTE DES ACRONYMES

page 75

GLOSSAIRE

page 76

RÉFÉRENCES ET RESSOURCES

page 78

CRÉDITS

CHAPITRE 1

page 10

Le CLIMAT UNE QUÊTE PERPÉTUELLE D'ÉQUILIBRE

par Marguerite Castel et Carole Saout-Grit

page 13

océan-atmosphère DES ÉCHANGES POUR LA VIE

par Carole Saout-Grit

page 16

La grande BOUCLE OCÉANIQUE, LOCOMOTIVE DU CLIMAT

par Carole Saout-Grit

CLIMAT & océan comment ça marche ?



LE CLIMAT

une QUÊTE PERPÉTUELLE D'ÉQUILIBRE

par Marguerite Castel et Carole Saout-Grit

Le système climatique est intimement lié au fonctionnement du système Terre, dont le rayonnement solaire est la principale énergie. Océan et atmosphère en sont les piliers, en interaction constante et toujours en quête d'équilibre. Le climat, qui diffère d'une zone du globe à l'autre, évolue au cours du temps sous l'effet de processus d'origine naturelle et humaine.

Les planisphères accrochés aux murs des classes nous l'ont enseigné avec de belles prouesses illustrées. Il fait chaud et sec au Sahara, doux et humide en Bretagne, froid en Alaska. Nous savons qu'il existe plusieurs types de climats sur la Terre, comme il existe deux ou quatre saisons durant une année selon les zones géographiques. Ces différences, nous les intégrons depuis toujours. Pour autant, savons-nous comment fonctionne réellement le climat ?

Une machine climatique complexe nourrie par le soleil

Toutes les situations météorologiques et climatiques du globe terrestre sont le fruit d'une seule et même machine alimentée par le soleil. Le système climatique est à la fois subtil et complexe parce qu'il est le lieu de multiples processus d'interactions entre les 5 sphères qui font la planète Terre :

- > l'atmosphère (l'air présent à la surface de la Terre, depuis le sol jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude),
- > l'hydrosphère (ensemble de l'eau présente sur Terre quelque soit son état liquide, solide ou gaz),

- > la cryosphère (glace, neige et glaciers),
- > la lithosphère (sols et roches présentes à la surface des continents et sur le fond des océans)
- > la biosphère (l'ensemble du vivant sur terre, air, mer et sous-sol).

La Terre est entourée d'une couche de Gaz à Effet de Serre (GES), naturellement présents dans l'atmosphère depuis toujours : vapeur d'eau, dioxyde de carbone, ozone et méthane principalement.

Lorsque le soleil rayonne sur la planète Terre, ces GES absorbent une partie (70% seulement) du rayonnement solaire incident, qui constitue la composante infrarouge du spectre solaire. L'atmosphère terrestre agit en effet comme un filtre, relativement transparent au rayonnement visible mais plus opaque au rayonnement invisible de grande longueur d'onde (ou infrarouge thermique) qui est fortement absorbé par ces gaz atmosphériques, en particulier la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

Cette composante infrarouge traverse l'atmosphère pour arriver sur la surface terrestre et réchauffer la Terre.

Celle-ci émet à son tour un rayonne-

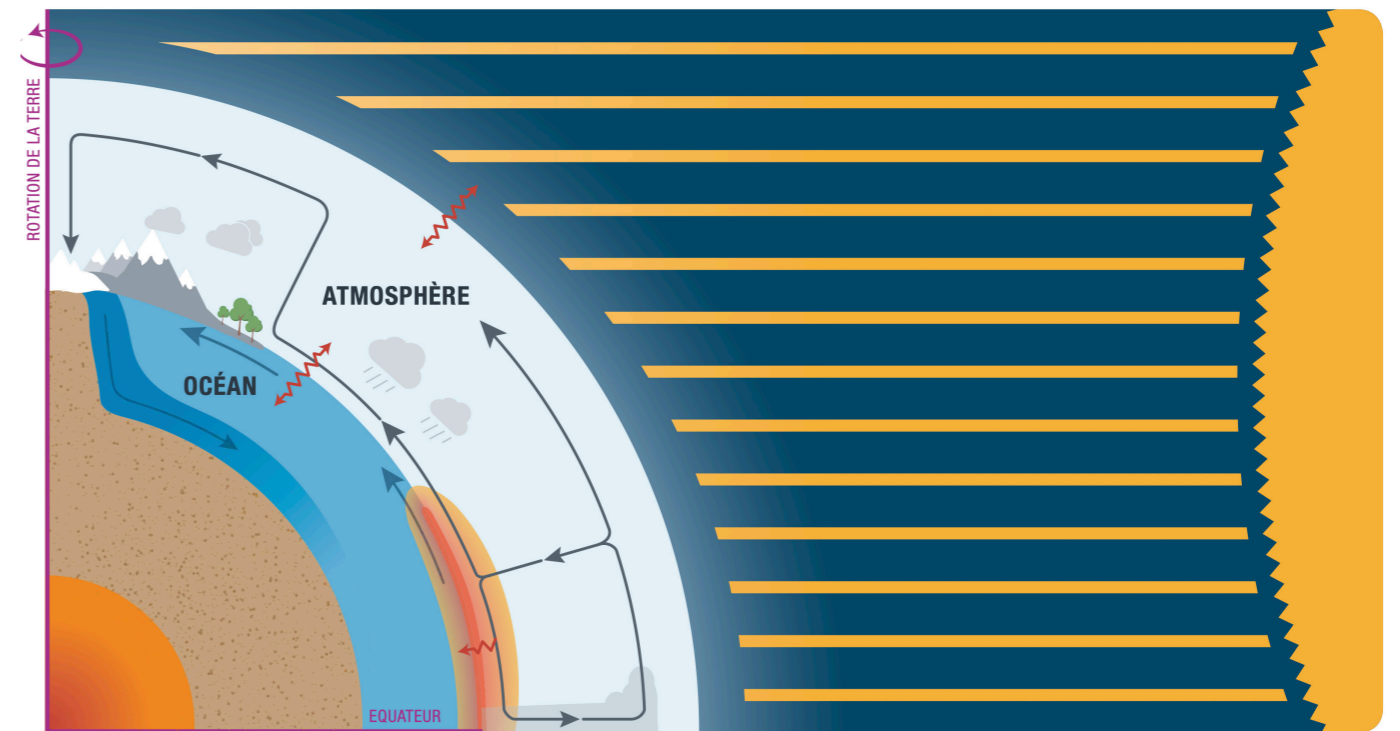
ment infrarouge qui repart en direction de l'espace...mais pas en totalité, car les GES contenus dans l'atmosphère stoppent une partie de ce rayonnement infrarouge, qui à son tour revient en direction de la surface terrestre et réchauffe l'atmosphère.

Pour la Terre et les hommes qui y vivent, c'est une chance d'avoir cette couche de GES qui la protège. Car sans les GES, la température ne dépasserait pas -18°C à la surface de la Terre ; grâce à eux, elle est en moyenne de +15°C, ce qui la rend habitable. Ces GES jouent en quelque sorte le rôle de la vitre d'une serre qui laisse entrer la chaleur du soleil et l'empêche de ressortir, ce qui leur a donné leur nom.

Si l'atmosphère se réchauffe, c'est donc à la fois par cette capture du rayonnement infrarouge solaire incident, mais pas seulement. Elle est aussi réchauffée par le réchauffement de la surface terrestre, et en particulier par les océans qui la recouvrent à plus de 70%.

L'océan est le pilier de la machine climatique

Du fait de son axe incliné et de son



Schématisme de l'effet de serre © Office for Climate Education

orbite elliptique autour du soleil, la planète Terre reçoit naturellement plus d'énergie solaire à l'équateur et dans la zone tropicale (où les rayons arrivent perpendiculairement au sol) que dans les régions polaires (où les rayons arrivent de manière inclinée).

Ce sont les sphères atmosphériques et océaniques, constituant les deux enveloppes fluides principales de la Terre, qui jouent le rôle de redistributeur de cette énergie solaire et orchestrent le climat.

Entre l'atmosphère et l'océan, véritable réservoir d'eau qui concentre 96% de l'eau liquide disponible sur le globe, l'échange de chaleur se fait essentiellement sur la base du cycle de l'eau. Les changements de phases de l'eau, entre évaporation et condensation, entraînent des échanges de chaleur principalement latente (1) :

- > lorsqu'il chauffe, l'océan s'évapore et cède de la chaleur latente à l'atmosphère.
- > lorsqu'il se refroidit, la vapeur d'eau se condense dans l'atmosphère en for-

mant des gouttelettes d'eau, et la chaleur latente de condensation est relâchée dans l'atmosphère.

L'équilibre énergétique de la planète et l'installation des conditions climatiques par zones géographiques sur le globe sont atteints grâce au couple océan-atmosphère et à leurs échanges permanents.

La météo n'est pas le climat

Tout le monde ou presque mesure le « temps qu'il fait » au-dessus de sa tête, qui renvoie à la météorologie et à la notion de conditions météorologiques à un instant donné sur une courte période (journée ou semaine).

Parallèlement, la notion de « climat » renvoie à l'ensemble des éléments qui caractérisent un état moyen de l'atmosphère sur une longue période. On définit le climat comme la description statistique (valeurs moyennes et variations) de l'ensemble des conditions météorologiques (température, précipitations, durée d'ensoleillement,

intensité des vents etc...) sur une période de référence que l'Organisation météorologique mondiale (OMM) fixe à 30 ans pour la description des états du climat. C'est ainsi que l'on surveille le changement climatique et que l'on classe les différentes conditions climatiques des différentes régions du monde. En comparaison avec la météorologie, le climat évolue donc très lentement.

Changements climatiques et prévisions

De nombreuses disparités climatiques existent, du nord au sud et d'est en ouest. Qu'il soit froid, tempéré, continental, océanique ou désertique, un climat diffère d'une zone du globe à l'autre, et c'est ainsi depuis la nuit des temps.

Climat et système climatique ont toujours évolué. Les raisons de ces changements sont diverses étant donné que le système climatique est influencé par de nombreux facteurs.

Outre les émissions anthropiques de GES et d'aérosols et la modification de l'utilisation des sols, il existe de nombreux facteurs naturels tels que les éruptions volcaniques, les variations de l'activité solaire et de la rotation de la Terre autour du soleil, les modifications de la composition chimique de l'atmosphère, l'évolution de la végétation, et bien d'autres encore qui influent sur le climat à différentes échelles spatiales et temporelles.

Mais depuis 1988 et la naissance du groupement international pour l'étude du climat (GIEC), les 1500 scientifiques de 80 pays ont établi un « changement climatique » hors-norme jamais mesuré, visible en particulier depuis l'ère industrielle et qualifié comme tel en référence à la période de 1850 à nos jours.

Si certains facteurs naturels sont toujours responsables de modifications du climat à très long terme, il est clair que les processus humains sont la cause de modifications à court terme. Le déséquilibre constaté est trop rapide et trop intense pour n'être dû qu'à des variations naturelles du climat. Les résultats des modèles numériques, associés aux observations atmosphériques et océaniques des dernières décennies, sont sans appel : les activités humaines modifient artificiellement l'équilibre énergétique de la planète.

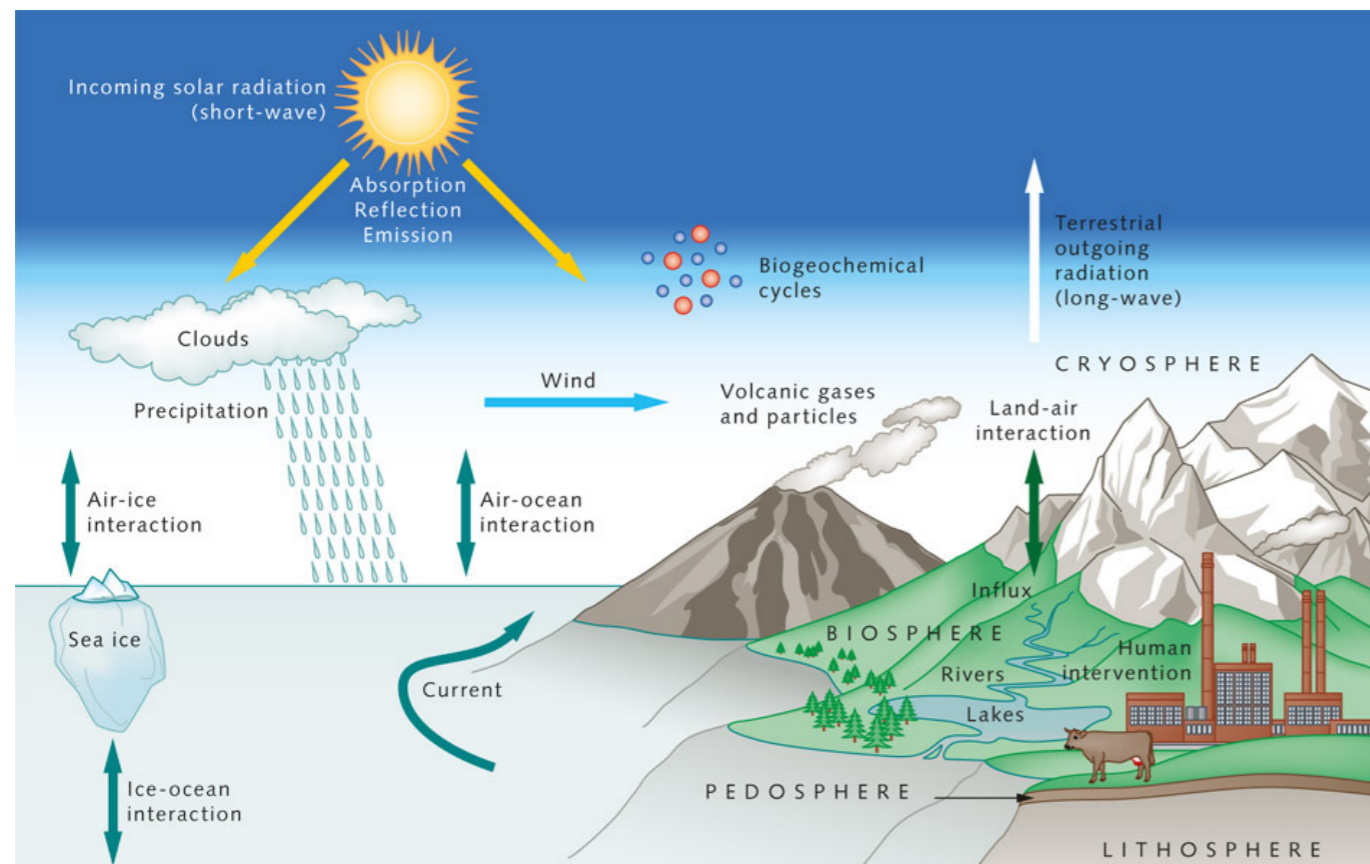
Dans son dernier rapport paru en mars 2023, le GIEC confirme une augmentation de la température à la surface du globe de +1,1°C par rapport sur la période 1850-1900, qui pourrait atteindre +1,5°C d'ici 2030 si les émissions

de GES d'origine anthropique ne réduisent pas. Les scientifiques estiment aujourd'hui que le surplus de chaleur stocké dans l'atmosphère n'est que de 1% par rapport à la totalité, et que plus de 90% de l'excès de chaleur provoqué par les activités humaines depuis l'ère industrielle a été stocké par l'océan.

Face à ces constats, posons-nous les bonnes questions. N'avons-nous pas vécu des événements météorologiques extrêmes cette année : très fortes tempêtes en Bretagne-Normandie, fortes précipitations entraînant des inondations dans les Hauts de France, canicules et sécheresses dans tout le sud de l'Europe ?

⁽¹⁾ Par définition, la chaleur latente est la quantité d'énergie nécessaire pour faire changer d'état à un gramme de matière à température constante.

Système climatique, processus et interactions entre les sphères terrestres. © World Ocean Review #01



océan-ATMOSPHERE

DES ÉCHANGES POUR LA VIE

par Carole Saout-Grit

L'océan par ses propriétés chimiques et physiques est le plus gros réservoir de chaleur de notre planète. Il joue le rôle de thermostat du système climatique terrestre. Le déficit de chaleur des hautes latitudes par rapport aux basses latitudes est compensé par une redistribution de l'énergie solaire assurée par la mise en mouvement de l'atmosphère et de l'océan.

L'océan et l'atmosphère sont les deux sphères les plus importantes de la Terre pour le système climatique. Elles ont comme point commun d'être constituées chacune par des fluides⁽¹⁾, de l'air pour l'atmosphère et de l'eau pour l'océan. Leur influence sur le climat ne se fait pas avec le même ordre de grandeur, du fait des propriétés physiques bien différentes entre l'air et l'eau.

L'océan, un énorme réservoir de chaleur

La masse volumique⁽²⁾ de l'eau de mer, qui vaut 1025 kilogrammes par mètres cube en surface, est environ 800 fois celle de l'air à la pression atmosphérique. Sa chaleur spécifique est également très élevée, valant 4000 Joules par kilogramme par Kelvin, soit 4 fois celle de l'air. Ces deux caractéristiques valent à l'océan une très forte inertie thermique et une énorme capacité à accumuler de la chaleur. Ainsi, les 2,5 premiers mètres de l'océan contiennent autant de chaleur que l'ensemble de la colonne atmosphérique qui les surplombe, soit environ 70 kilomètres !

En complément, l'océan n'est pas qu'une simple ligne d'horizon mais

il est très profond. Sa profondeur moyenne de 3800 mètres fait de lui un immense réservoir de chaleur, doté d'une très forte inertie thermique, ce qui lui confère le nom de « thermostat » de la planète.

Deux enveloppes fluides aux propriétés différentes

L'atmosphère terrestre est une fine enveloppe de gaz entourant la planète Terre et composée d'un mélange appelé air. On peut représenter l'atmosphère comme un millefeuille composé de plusieurs couches atmosphériques d'épaisseurs différentes. La troposphère la plus proche de nous, qui s'étale du sol jusqu'à 16 kms d'altitude, est le siège de la plupart des phénomènes météorologiques. L'épaisseur totale de l'atmosphère est très faible comparée au rayon de la Terre, et les 9/10 de sa masse sont concentrés dans la troposphère.

Les constituants majeurs de l'air atmosphérique sont le diazote (N_2 , à 78%), le dioxygène (O_2 , à 21%) et quelques gaz rares dont le dioxyde de carbone (CO_2 , à 0,041%), qui constituent majoritairement l'air dit « sec ». La vapeur d'eau qui s'y ajoute pour constituer

l'air « humide » est minoritaire dans la composition de l'atmosphère, et représente 0,25% de sa masse totale. Mais elle constitue pourtant un élément-clé de l'équilibre du système climatique.

L'océan de son côté couvre 71% de la surface de la planète et représente une fine pellicule d'eau salée, qui concentre 96% de l'eau liquide disponible sur Terre. L'eau des océans proviendrait d'échanges très anciens entre les fonds marins et le manteau terrestre (la couche du globe située de 5 à 2900 kilomètres de profondeur). Ceci explique que l'eau de mer soit constituée à 96,5% d'eau pure, et à 3,5% de substances dissoutes comme les sels ou les gaz.

L'océan est une immense solution chimique puisque sur les 94 éléments naturels recensés dans le fameux tableau de Mendeleïev⁽³⁾, une grande partie entre dans la composition de l'eau de mer, et souvent à l'état de traces. La concentration de ces espèces chimiques, qui se mesure en millimoles par litre, ne varie que très faiblement d'un bout à l'autre de la planète. Malgré tout, déterminer de manière précise la « salinité » de l'océan est un défi pour les océanographes, car elle contribue à modifier la densité de



l'eau qui met l'océan en mouvement et participe à l'équilibre du système climatique.

Des échanges de chaleur et de mouvement à l'interface air-mer

L'influence de l'atmosphère et de l'océan sur le système climatique se fait grâce aux échanges permanents qu'ils opèrent à l'interface air-mer, en particulier pour assurer la redistribution de l'énergie solaire.

La distribution des flux de chaleur solaire reçue par la planète Terre n'est pas uniforme dans le temps ni dans l'espace. Géographiquement, la zone équatoriale, située entre 40°S et 40°N, est celle qui reçoit un excès d'énergie solaire, tandis que les zones polaires, situées au-dessus de 40°N et en-dessous de 40°S, accusent un déficit d'énergie solaire. Ce déséquilibre entraîne la mise en mouvement de l'atmosphère et de l'océan, les deux fluides de la planète capables de transporter cet excès d'énergie des régions de basse latitude vers les régions déficitaires des latitudes élevées, afin d'atteindre un équilibre. Cette redistribution de la chaleur solaire se fait

grâce aux circulations atmosphérique et océanique, à part égale.

Dans l'atmosphère, la redistribution méridienne de l'énergie se fait à travers la circulation atmosphérique, dont l'unique moteur est l'ensoleillement. Sous les contraintes de la gravité, de la poussée d'Archimède et de la force de Coriolis, les différences de température entre l'équateur et les pôles font circuler l'air tout autour de la Terre. Cette circulation atmosphérique prend une forme cellulaire, placée de part et d'autre d'une « zone de convergence intertropicale »⁽⁴⁾, laquelle se déplace en suivant le mouvement apparent du soleil.

Mais les transferts de chaleur pour équilibrer le bilan de chaleur de la Terre se font aussi par la mise en mouvement de l'océan et les courants océaniques.

En surface, la circulation océanique est rapide, pilotée par la rotation de la Terre et les vents atmosphériques. Ces mouvements se propagent vers les grandes profondeurs de l'océan, sous l'effet de la rotation de la Terre, de la topographie variée des différents bassins océaniques et surtout des va-

riations en température et en salinité de l'eau de mer lorsqu'elle est en contact avec l'atmosphère en surface, et qui entraînent une mise en mouvement de l'océan sur la verticale.

Les échelles de temps de ces deux circulations, atmosphérique et océanique, sont très différentes, de l'année pour la première au millier d'années pour la seconde. Et la circulation océanique de surface, forcée principalement par les vents, est beaucoup plus rapide que la circulation très lente à l'intérieur de l'océan du fait des propriétés physiques de l'eau.

Le cycle de l'eau au cœur du système climatique

Enfin, les échanges entre atmosphère et océan ne sont pas que mécaniques ou physiques, ils sont aussi chimiques et gazeux. En particulier, l'eau s'échange en permanence à la surface de la mer, et une grande partie de l'énergie terrestre qui gouverne le système climatique est directement liée aux échanges air-mer qui se font grâce au cycle de l'eau.

L'eau est en effet le seul composant

naturel présent sur Terre sous ses 3 états : liquide le plus fréquent, dans les mers, fleuves, rivières et pluies ; solide, dans la neige et les glaces ; gazeux, invisible comme la vapeur d'eau.

La modification de sa température, dans un état donné à un endroit donné, libère de la chaleur dite « sensible », qui contribue à un transfert d'énergie dans le système climatique. En parallèle, les changements de phases de l'eau libèrent de la chaleur dite « chaleur latente », qui est nettement plus importante.

Quand le soleil rayonne et réchauffe fortement les zones équatoriales, l'évaporation de l'eau de l'océan vers l'atmosphère s'accompagne d'une consommation d'énergie. Quand cette vapeur d'eau, transportée par la circulation atmosphérique vers les zones polaires, se condense par refroidissement pour aboutir à la formation de gouttelettes d'eau puis de nuages, elle restitue une partie de cette chaleur latente dans l'atmosphère.

Au-delà de la vapeur d'eau, d'autres gaz, comme l'oxygène ou le dioxyde de carbone, ainsi que certains nutriments (comme l'azote ou l'hydrogène) essentiels à la vie marine, s'échangent continuellement à l'interface air-mer.

Des échanges de gaz nécessaires à la vie terrestre

En particulier, l'oxygène est l'atome le plus répandu sur la planète, présent dans l'air et dans l'eau (sous forme de dioxygène H₂O). Sur terre comme en mer, c'est le vivant qui contrôle la teneur globale en oxygène de la planète, à la fois par le mécanisme de photosynthèse (pour en produire) et par celui de la respiration (pour en consommer). L'océan en surface est oxygéné dans une couche proche de l'atmosphère, à la fois mélangée par le vent et illuminée par le soleil où se produit l'essentiel de la photosynthèse marine.

De son côté, le CO₂ s'échange entre air et mer par des processus de transferts de gaz, pénétrant par dissolution et s'échappant par dégazage. Ces

échanges sont d'autant plus importants que les vents à l'interface air-mer en surface sont forts. Comme la solubilité de tout gaz dissous diminue lorsque la température augmente, la concentration en CO₂ dans l'océan est directement reliée à la température de ses eaux, donc plus importante dans les eaux froides profondes que dans les eaux chaudes de surface.

Les processus physiques, chimiques et biologiques (la photosynthèse utilisant du CO₂ pour produire de l'oxygène) expliquent pourquoi l'océan contraint fortement, et naturellement, la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone. Dans le contexte actuel du changement climatique, on estime que l'océan a absorbé 30% du CO₂ injecté dans l'atmosphère par les activités humaines.

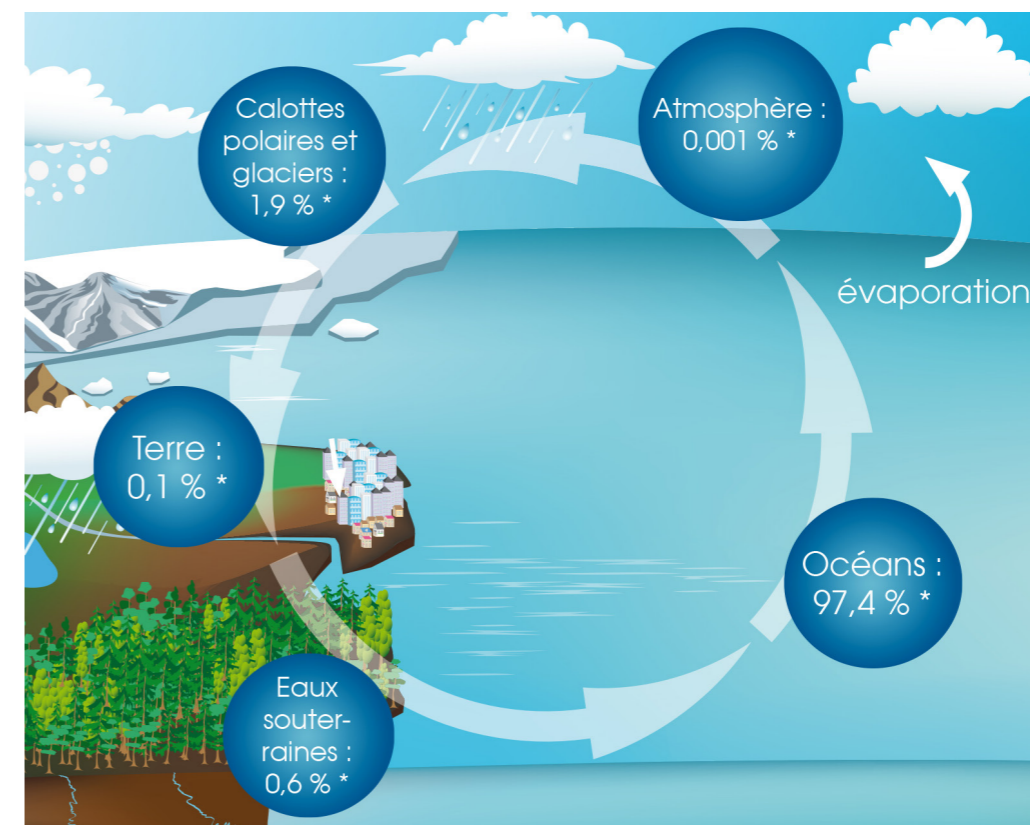
Les échanges de chaleur et de mouvement entre l'atmosphère et l'océan sont entièrement couplés aux échanges des gaz qu'ils contiennent. Ensemble, ils participent à l'équilibre d'un système climatique à la fois complexe et subtil.

⁽¹⁾ Un fluide est un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler.

⁽²⁾ La masse volumique d'une substance est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume.

⁽³⁾ En 1869, le chimiste russe Dmitri Ivanovitch Mendeleïev a construit une table périodique pour classer tous les éléments chimiques connus en les ordonnant par numéro atomique croissant et suivant leur configuration électronique.

⁽⁴⁾ espace où se rencontrent les alizés de nord-est provenant de l'hémisphère nord avec les alizés du sud-ouest provenant de l'hémisphère sud



Le cycle de l'eau
© Océan & Climat 2016

La grande BOUCLE océanique, LOCOMOTIVE DU CLIMAT

par Carole Saout-Grit

" REPRÉSENTE-TOI LA CIRCULATION DES COURANTS MARINS DANS L'Océan COMME LA CIRCULATION SANGUINE DANS NOTRE CORPS.

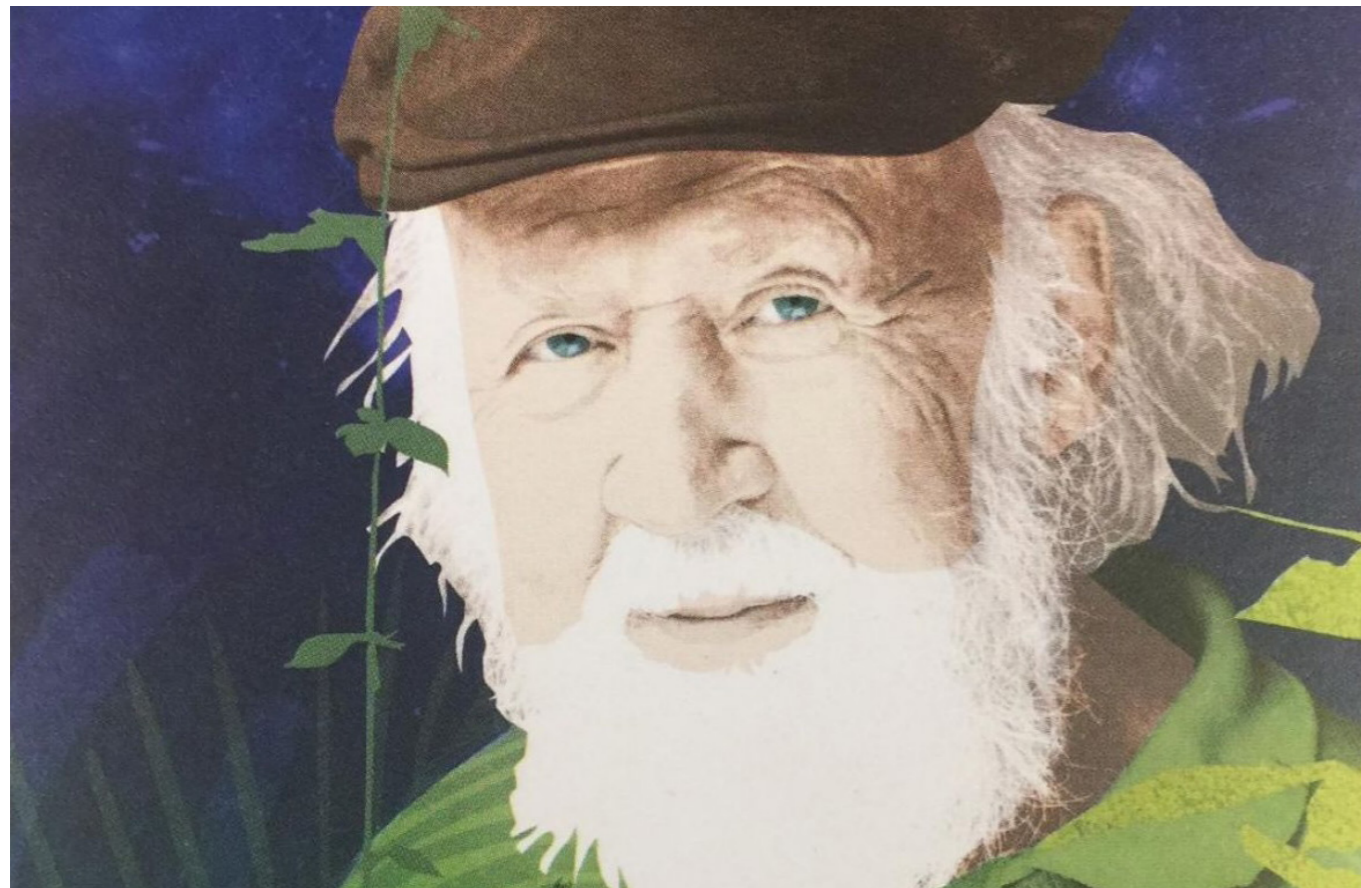
TON SANG EST ENVOYÉ PAR UNE POMPE, LE CŒUR, DANS TOUS LES ORGANES. IL TRANSPORTE DE L'ÉNERGIE, DES ÉLÉMENTS DISSOUS ET DES PARTICULES. IL VA ENSUITE RECHARGER EN OXYGÈNE TES POUMONS ET REMONTER AU CŒUR. ET LE CIRCUIT SE POURSUIT EN PERMANENCE.

DANS L'Océan, LES ARTÈRES PRINCIPALES SONT LES COURANTS PROFONDS QUI RÉPARTISSENT LES EAUX DANS L'ENSEMBLE DES GRANDS FONDS, DANS TOUS LES BASSINS, PUIS LA CIRCULATION VEINEUSE ET PULMONAIRE PREND LE RELAIS EN RAMENANT LES MASSES D'EAU PAR LES COURANTS DE SURFACE JUSQU'À LA POMPE PRINCIPALE QUI SE TROUVE EN MER DE NORVÈGE.

LE TOUT RESSEMBLE À UN TAPIS ROULANT. "

EXTRAIT "LA MER EXPLIQUÉE À NOS PETITS-ENFANTS" - HUBERT REEVES, YVES LANCELLOT, 2015

Portrait de Hubert Reeves © La Terre vue du coeur



L'équilibre du système climatique se fait en partie grâce à la circulation océanique. Forcée en surface par les vents atmosphériques, cette circulation est surtout très active en profondeur à l'intérieur de l'océan. Pilotée par les changements de densité des masses d'eaux océaniques, cette circulation profonde appelée « circulation thermohaline » est la composante lente du système climatique, octroyant à l'océan le rôle de mémoire du climat.

L'océan n'est pas qu'une jolie ligne d'horizon. C'est un réservoir profond, très profond de près de 3800 mètres de profondeur, parsemé en son sein d'un millefeuille de masses d'eaux océaniques. Une masse d'eau océanique est une énorme quantité d'eau, relativement homogène et aux caractéristiques physiques et biogéochimiques bien définies. Chaque masse d'eau dans l'océan est caractérisée par sa masse volumique, ou densité, qui fait que globalement, plus une masse d'eau est dense, plus elle est lourde.

Un millefeuille de masses d'eaux océaniques

La densité varie en fonction de trois paramètres fondamentaux qui caractérisent l'océan : la température, la salinité et la pression due à la profondeur. La température décroît fortement avec la profondeur, avec une valeur moyenne sur l'océan de 3,7°C. Assez logiquement sur le globe, on retrouve les eaux les plus chaudes en surface dans les zones équatoriales, et les eaux les plus froides en profondeur et dans les zones polaires.

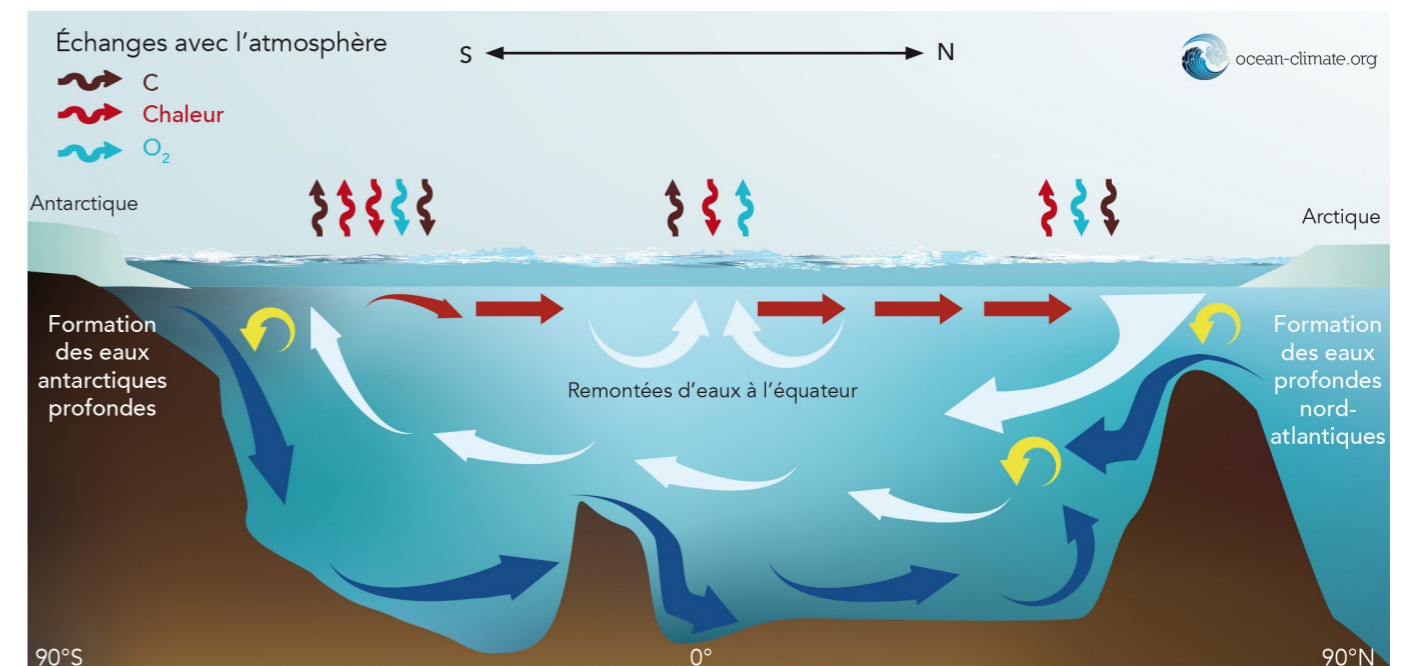
Parallèlement, la salinité de l'eau de mer est assez stable en profondeur et sur l'ensemble de la planète. Se mesurant en grammes de sel par litre d'eau ou avec l'unité psu (prac-

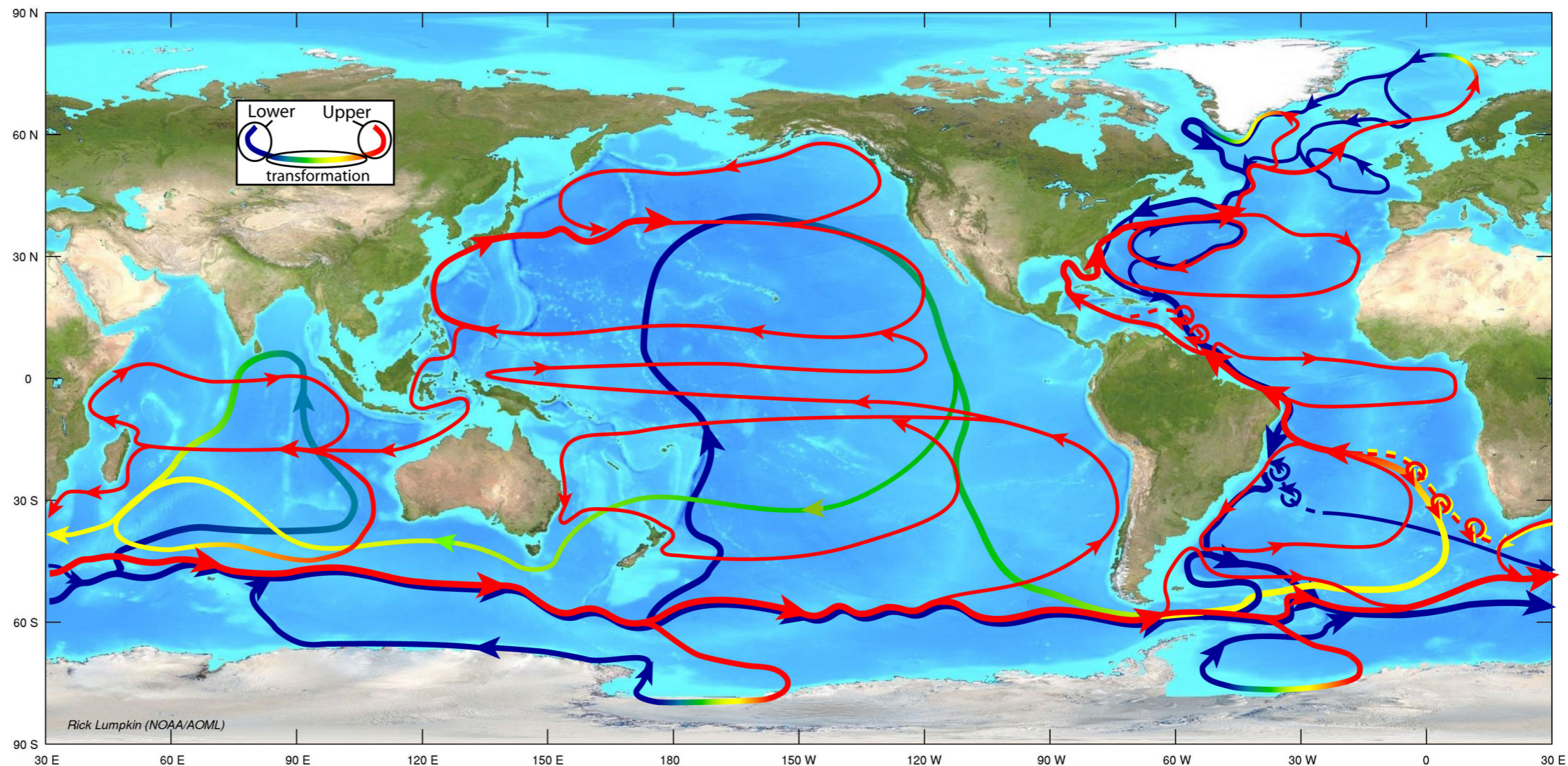
tical salinity per unit) en océanographie, elle a des valeurs qui oscillent entre 30 et 38 psu en surface sur l'ensemble du globe, avec une valeur moyenne de 34,7 psu qui se rapproche de la teneur en sel généralement retrouvée dans les eaux profondes.

Au départ, chaque masse d'eau prend ses caractéristiques (en température, salinité, gaz dissous, concentration en CO₂) dans l'intervalle de temps où elle est en contact avec l'atmosphère et le rayonnement solaire. Une fois dans l'océan, chacune conserve ses propriétés tant qu'elle ne revient pas en contact avec l'atmosphère.

Les lois de la physique font qu'une particule d'eau chaude est plus légère, donc moins dense qu'une particule d'eau froide. Elles font aussi qu'une particule d'eau salée est plus lourde, donc plus dense, qu'une particule douce. Dans l'océan, on retrouve donc naturellement les masses d'eaux les plus froides et les plus salées dans les très grandes profondeurs. Et à l'inverse, les masses d'eaux les plus chaudes et les plus douces en surface. Globalement, les masses d'eaux résident en général seulement quelques jours dans les couches superficielles de l'océan, mais circulent pendant plusieurs siècles en profondeur.

La circulation océanique dans l'Atlantique - © Océan & Climat 2016





1000 ans pour faire le tour de la planète

Dans l'hémisphère nord au cœur de l'Atlantique tropical, les eaux de surface ont une densité légèrement supérieure aux eaux environnantes, par augmentation de leur salinité due au fort rayonnement solaire et à l'évaporation associée. Ces eaux tropicales de surface sont progressivement entraînées vers les régions plus tempérées de l'Atlantique Nord sous l'impulsion des courants océaniques en surface, notamment le Gulf Stream et le courant nord-atlantique actionnés par les vents.

Progressivement, elles sont refroidies et perdent de leur température et de leur densité. Elles sont alors entraînées de la surface vers les profondeurs intermédiaires, en s'enfonçant horizontalement pour être remplacées au fur et à mesure par des eaux superficielles plus légères.

Arrivées dans les hautes latitudes, notamment en mer de Norvège, la violence des vents est telle qu'elle refroidit et rend homogène ces eaux en température, en salinité et en densité sur une épaisseur de plusieurs centaines de mètres sur la verticale. Ces masses d'eaux homogènes et froides sont alors si denses, parfois rendues encore plus denses dans les régions polaires par la congélation de l'eau et la

formation de glace de mer, qu'elles plongent vers les abysses. Elles génèrent de puissants mouvements verticaux dits de convection, et la mise en place de courants profonds intenses. Elles rejoignent alors d'autres masses d'eaux qui de façon similaire, ont plongé par effet de densité dans les mers du Groenland, d'Islande ou du Labrador. Toutes se rejoignent au nord du bassin Atlantique pour former en profondeur, les Eaux profondes Atlantique.

Guidées par la topographie et la bathymétrie du bassin Atlantique, ces eaux profondes redescendent progressivement dans les abysses vers le pôle Sud. Elles rejoignent alors l'océan Austral où elles seront rapidement entraînées par le puissant Courant Circumpolaire Antarctique qui encercle le continent Antarctique. Le mélange des masses d'eau dans les profondeurs océaniques, associé aux vents dominants de l'Atlantique Sud, entraînent une remontée progressive des eaux profondes vers la surface dans les zones tropicales des bassins océaniques Indien et Pacifique. A densité proche, ces eaux superficielles se retrouveront à nouveau pour regagner les régions tropicales et équatoriales du bassin Atlantique et rejoindre leur point de départ.

Au total, la circulation océanique mondiale s'apparente à un gigantesque tapis roulant sans fin, qui connecte les mou-

vements de l'océan de la surface jusqu'aux profondeurs intermédiaires et abyssales. Les scientifiques estiment qu'une particule d'eau met environ 1000 ans à parcourir ce long trajet, d'un point de départ jusqu'au son retour au même point.

Dans l'océan, la circulation océanique profonde, pilotée par les différences de densité des masses d'eau liées à leur température (thermo-) et à leur salinité (halin-), est appelée en océanographie circulation thermohaline. Globalement, elle joue un rôle fondamental dans le système climatique puisqu'elle transfère les propriétés des masses d'eau (comme l'oxygène, le CO₂ ou les sels nutritifs) de l'atmosphère vers l'océan profond, et ce sur des milliers de kilomètres. Elle contribue donc non seulement à la redistribution de la chaleur solaire mais aussi aux équilibres chimiques de l'océan et aux grands cycles biologiques et chimiques de la planète.

Incidence de la variabilité de la circulation thermohaline sur le climat

La circulation thermohaline constitue l'une des composantes majeures de l'équilibre thermique océan-atmosphère. Particulièrement lente, avec une vitesse moyenne de l'ordre du millimètre par seconde, elle échappe souvent aux mesures

directes alors que sa compréhension est nécessaire à l'examen des variations du climat à long terme.

Elle représente donc un véritable défi d'observations pour les scientifiques.

La variabilité extrêmement lente de cette circulation reste encore peu connue puisque les premières mesures remontent à 80 ans avec l'expédition allemande du METEOR en Atlantique en 1925-1927. Les trois grands océans Atlantique, Indien et Pacifique, ont été observés ensuite par de grands programmes internationaux comme GEOSECS (1972-1978) puis WOCE (1990-1997).

Certaines régions, notamment celles où se passent la convection des eaux de surface vers les grandes profondeurs, font évidemment l'objet de projets scientifiques croissants. Sur le globe, il existe des grandes régions de convection bien identifiées aujourd'hui par les océanographes : les mers de Norvège, du Groenland et du Labrador en Atlantique Nord ; les mers de Ross et de Weddell dans l'océan Austral.

En Atlantique Nord, le programme OVIDE a été le premier observatoire imaginé en 2002 pour suivre l'évolution sur plusieurs décennies de cette circulation thermohaline profonde et sa relation avec le climat.

CHAPITRE 2

page 22

ÉDITO

par Maud Lénée-Corrèze

page 24

UN OBSERVATOIRE INÉDIT POUR SURVEILLER L'ATLANTIQUE NORD

par Maud Lénée-Corrèze

page 28

"IL NOUS FAUT DES DONNÉES SUR 100 ans"

Interview de Herlé Mercier & Pascale Lherminier, océanographes - propos recueillis par Maud Lénée-Corrèze

page 32

LES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES D'OVIDE

par Maud Lénée-Corrèze

OVIDE

DEUX DÉCENNIES DE RECHERCHE en ATLANTIQUE NORD



ÉDITO

par Maud Lénée-Corrèze

Pour comprendre et décrire la circulation océanique, il faut l'observer, la mesurer et la suivre in-situ (sur place) en mer, mettre à l'eau des instruments, ou déployer des satellites altimétriques en orbite au-dessus des océans.

Une meilleure compréhension de la circulation dépend des avancées technologiques en matière d'observation et de collecte de données. C'est dans les années 1990, avec l'arrivée de nombreuses technologies et la multiplication des moyens en mer, qu'un premier grand programme international a pu se mettre en place, WOCE (pour World Ocean Circulation Experiment), et donner une première image de la circulation océanique.

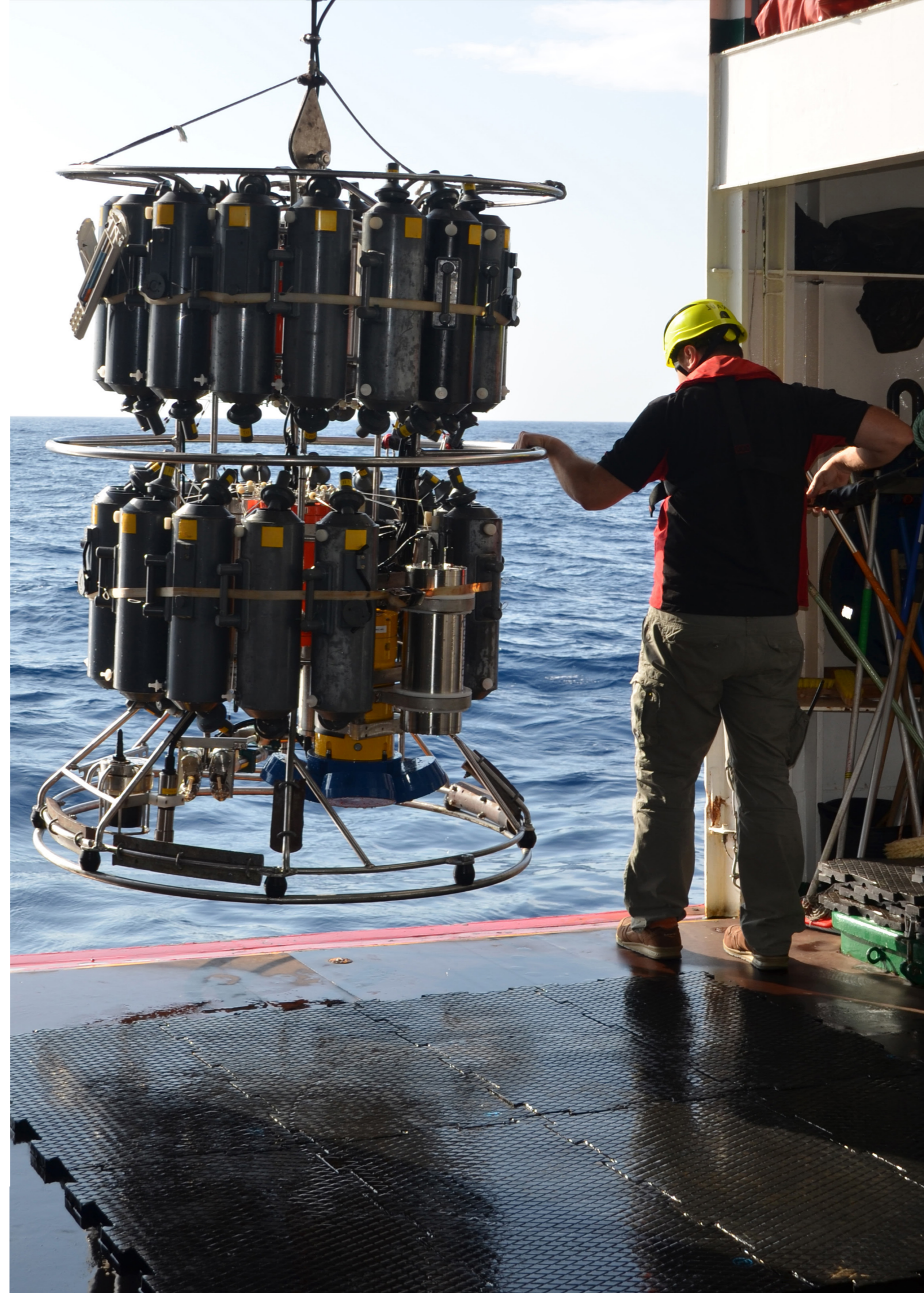
Dans un contexte de changement climatique et avec l'inquiétude de ses conséquences sur une circulation encore mal comprise, il fallait plus de données. Conscients de ce besoin, les scientifiques et les États ont poursuivi les efforts d'observation in situ. En particulier en France et en Espagne, le programme OVIDE (pour Observatoire de la variabilité interannuelle et décennale en Atlantique Nord) a été imaginé au début des années 2000 par Herlé Mercier, océanographe physicien et directeur de recherches au CNRS.

Ce programme franco-espagnol⁽¹⁾ continue aujourd'hui, vingt-deux ans plus tard, avec de nouveaux chercheurs engagés, à l'instar de Pascale Lherminier, océanographe physicienne au LOPS et cheffe de mission OVIDE en 2008.

Le programme OVIDE se penche donc spécifiquement sur la circulation océanique en Atlantique Nord, cet AMOC connu des océanographes pour être la Circulation méridienne de retournement en Atlantique Nord, dont les composantes les plus connues sont le Gulf Stream et le courant nord-atlantique.

Alors qu'en plus de vingt ans d'observations, les scientifiques ont pu constater une variabilité saisonnière très forte, ils n'ont pas encore identifié de tendance générale, même si quelques paramètres de cette circulation ont évolué.

⁽¹⁾ OVIDE est porté en France par le LOPS, le Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale (une unité mixte de recherche portée par l'Université de Bretagne occidentale, le CNRS, Ifremer et l'IRD) ; pour l'Espagne, par l'université de Vigo et le Conseil supérieur de la recherche scientifique (CSIC).



UN OBSERVATOIRE INÉDIT POUR SURVEILLER L'ATLANTIQUE NORD

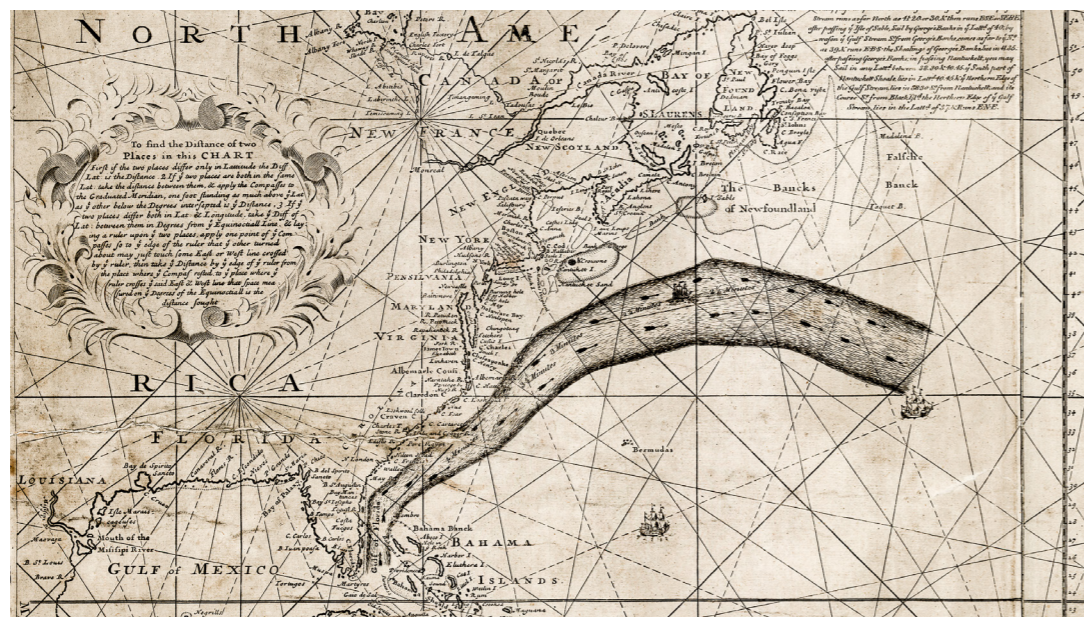
par Maud Lénéé-Corrèze

L'Atlantique Nord est le théâtre d'une circulation océanique intense, du nord au sud et de la surface au fond. Depuis les années 1950, elle est globalement théorisée. Les observations permettant d'identifier les différents courants qui la composent datent des années 1990 ; elles n'ont cessé de s'affiner depuis. Aujourd'hui, les scientifiques savent la décrire précisément, bien que des zones d'ombre persistent.

Découvert par les navigateurs du XVIII^e siècle, cartographié par Benjamin Franklin, puis décrit et compris dans son mécanisme durant les années 1950, le Gulf Stream est aujourd'hui bien identifié. Il fait même régulièrement la Une des journaux car l'inquiétude grandit lorsque certains modèles de climat prévoient son ralentissement. Un arrêt du Gulf Stream - prolongé par le courant nord-atlantique - qui transporte la chaleur depuis la zone subtropicale jusqu'à nos latitudes, signifierait probablement un changement du climat en Europe de l'Ouest. Pour bien comprendre ces deux courants, il faut les replacer dans le système global de la circulation océanique en Atlantique Nord, connue scientifiquement sous le nom d'AMOC (Atlantic meridional overturning circulation) ou circulation méridienne de retournement en Atlantique. Le Gulf Stream et le courant nord-atlantique sont des composantes de surface de l'AMOC.

Cette circulation est principalement verticale et thermohaline : elle est mise en mouvement par les différences de densité entre le nord et les latitudes équatoriales, c'est-à-dire par le gain ou la perte de salinité ou de chaleur de l'eau. Les masses d'eaux les plus denses, plus froides, plongent dans les profondeurs de l'océan, entre 1500 mètres et 3000 mètres, au niveau des hautes latitudes, au sud du Groenland et en mer du Labrador. Les courants profonds constituent la branche basse de l'AMOC.

Première carte du Gulf Stream représenté (en gris foncé) par Benjamin Franklin et Timothy Folger en 1769
© Library of Congress Geography and Map Division Washington DC 20540



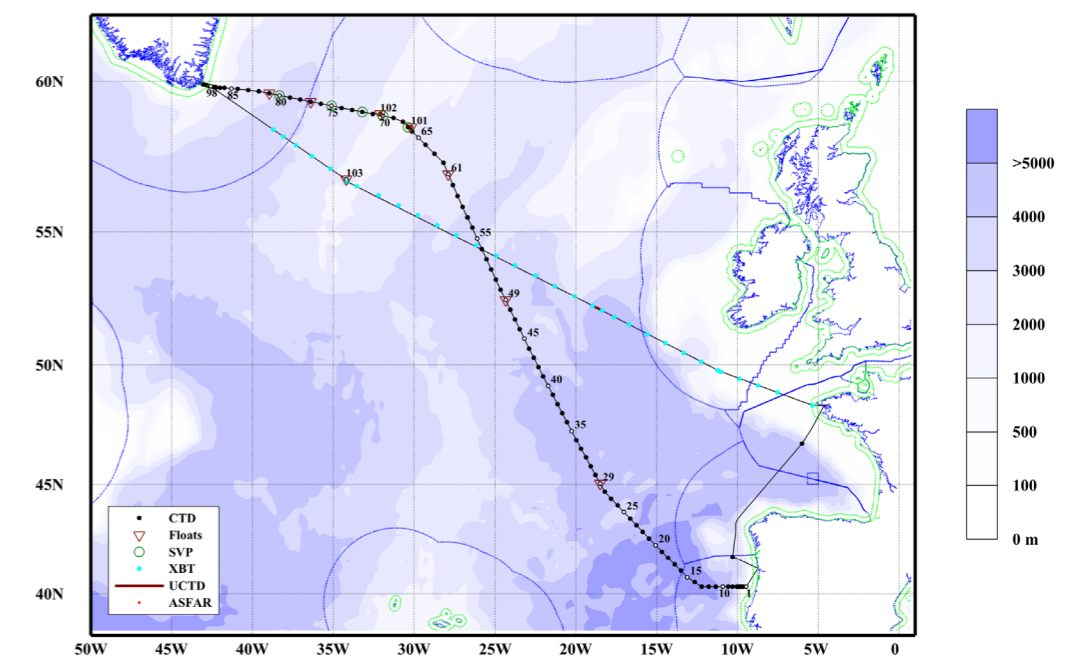
L'AMOC en CHIFFRES

A 26,5 degrés de latitude Nord, le débit de l'AMOC est de $18,75 \pm 2,1$ Sv⁽¹⁾ dans la branche haute.

A titre de comparaison, les débits moyens des fleuves principaux sont, à leur embouchure, de $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,0017 \text{ Sv}$ pour le Rhône, de $2\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,0023 \text{ Sv}$ pour le Rhin, de $8060 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,00806 \text{ Sv}$ sur la Volga, de $6400 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,0064 \text{ Sv}$ pour le Danube, $30170 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,03 \text{ Sv}$ pour le Yangtze, de $209000 \text{ m}^3/\text{s}$ soit $0,209 \text{ Sv}$ pour l'Amazone.

⁽¹⁾ Sverdrup : unité de débit (ou flux) volumique utilisée principalement en océanographie. Cette unité a été ainsi nommée en l'honneur de Harald Sverdrup (1888-1957), pionnier de cette science. Un sverdrup (Sv) correspond à $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Carte de la section OVIDE 2018 reliant le Portugal au Groenland
© OVIDE 2018



Équipe Scientifique de la campagne OVIDE 2018 ©Simon Barbot - Ifremer - Ovide 2018



Cette carte a été faite en partie grâce aux données OVIDE

On y voit les branches hautes de l'AMOC (flèches rouges) : d'une part, le Gulf Stream, formé dans le golfe du Mexique, qui remonte du coin sud-ouest de la carte, entre 25 et 35 degrés de latitude Nord, transportant sa chaleur des tropiques vers le nord. Cette zone a été longuement observée par le programme RAPID, qui effectue depuis 2004 des observations sur une section d'est en ouest sur le 26^e parallèle Nord.

À 40 degrés de latitude Nord, au niveau du sud-est de Terre-Neuve, le Gulf Stream se sépare en deux : une branche retourne vers le sud, tandis que deux autres branches continuent vers le nord, devenant le courant nord-atlantique, transportant toujours de la chaleur vers les hautes latitudes.

Ce faisant, les masses d'eau perdent en température, grâce aux échanges air/mer. On voit d'ailleurs que certaines flèches deviennent progressivement orange en remontant vers le nord. Ici, les échanges air/mer sont favorisés par les vents dominants, modulés selon un cycle de phases positive et négative, appelé oscillation nord-atlantique (NAO) ; un phénomène généré par le couple océan-atmosphère tel que El Niño.

La NAO influe donc sur la circulation océanique : en phase positive, les vents sont plus forts et les tempêtes plus fréquentes, les échanges air/mer sont donc également plus importants, c'est-à-dire que la chaleur transportée par le courant nord-atlantique est transmise de façon plus forte dans l'atmosphère. Résultat : en Europe du Nord, les hivers sont généralement doux et pluvieux, mais secs en Méditerranée. En phase négative, au contraire, les vents sont moins importants, diminuant les échanges de chaleur entre l'air et la mer ; les hivers sont donc plus froids.

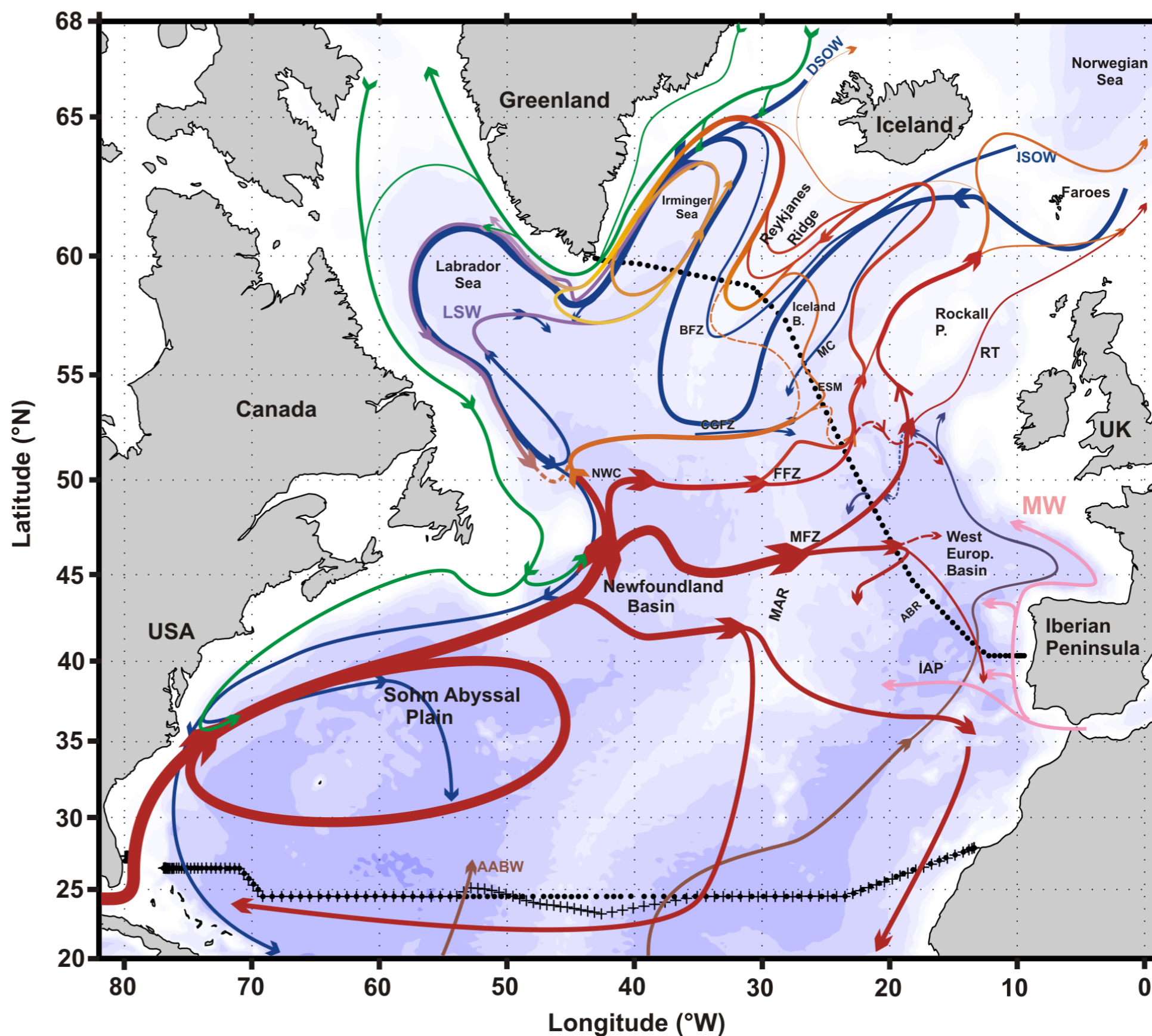
Au niveau du sud du Groenland, dans les mers de Labrador et d'Irminger, les eaux de surface venues des tropiques, plus salées et devenues froides, donc plus denses que les eaux de cette région, convectent verticalement vers les profondeurs et viennent former les courants profonds (flèches bleues).

« Au niveau de la mer d'Irminger, poursuit Pascale Lherminier, il y a une circulation très importante. Je crois que si on mettait une particule, elle pourrait faire le tour plusieurs fois, elle monterait, elle descendrait etc. C'est en Atlantique Nord que les échanges de chaleur sont les plus intenses entre l'Arctique et les subtropiques. Du fait de la formation complexe des terres, de la présence de forts reliefs sous-marins (par exemple le ride de Reykjanes) et des tempêtes, la région est particulièrement chaotique pour les circulations de surface et profonde.

"Elle est aussi la zone où il y a le plus de mélanges verticaux et de communication entre l'océan profond, les couches de surface et l'atmosphère. Ce n'est pas habituel : l'océan est d'ordinaire plutôt bien stratifié, assez calme en vertical. Ce qui fait qu'il y a beaucoup d'oxygénation et de stockage de carbone dans cette région. Dans le gyre subpolaire le carbone peut rejoindre les couches profondes et être isolé de la surface."

"S'IL N'Y AVAIT PAS CES ÉCHANGES, LE CO₂ RESTERAIT EN SURFACE ET RETOURNERAIT DANS L'ATMOSPHÈRE."

La branche basse de l'AMOC est constituée de plusieurs courants profonds : l'un, situé à environ 1500 mètres de profondeur, venant du gyre subpolaire, et l'autre, à 3000 mètres de profondeur, circulant depuis les mers nordiques. « Ces masses d'eau sont réexportées vers le sud, ajoute Herlé Mercier, pour remonter lentement vers la surface notamment au nord de l'océan Pacifique et dans l'océan Austral. »



"IL NOUS FAUT DES DONNÉES SUR CENT ANS"

Interview de Herlé Mercier & Pascale Lherminier, océanographes - propos recueillis par Maud Lénéé-Corrèze

Entretien croisé avec Herlé Mercier, océanographe physicien et directeur de recherche CNRS, et Pascale Lherminier, océanographe physicienne et chercheuse Ifremer. Tous deux sont membres de l'équipe « océan & climat » du Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale de l'Ifremer à Brest.

Comment décrit-on la circulation océanique, ces grands courants qui régissent notre climat ? Pas le choix : il faut se rendre sur place, plonger des instruments de mesure pour collecter des données ! Salinité, vitesse des courants, température, pression, sels nutritifs, pH etc.

Au début des années 2000, Herlé Mercier imagine à cet effet le programme OVIDE. Un observatoire de la variabilité inter-annuelle et décennale en Atlantique-Nord destiné à suivre et à étudier l'AMOC (la circulation méridienne de retournement en Atlantique) et toutes ses composantes, en particulier le courant nord-atlantique et les courants profonds.

Pascale Lherminier en est la cheffe de mission depuis 2008. Elle coordonne de nombreuses campagnes OVIDE. Tous deux expliquent les intérêts de cet observatoire inédit qui perdure depuis vingt-deux ans et qui, selon eux, est bien fondé à poursuivre sa mission.

Dans quel contexte scientifique avez-vous conçu, à la fin des années 1990, le programme d'observations in situ OVIDE ?

Herlé Mercier : À cette période, la communauté océanographique venait d'achever un grand programme international sur la circulation océanique, WOCE (World Ocean Circulation Experiment). Cette expérience a permis d'établir, en quelques années, une cartographie de tous les océans mondiaux. Nous avons fait des relevés hydrographiques et des relevés de traceurs, c'est-à-dire les éléments chimiques ou isotopes qui permettent de retracer l'histoire d'un processus. Ce que nous avons obtenu était une première image globale, mais un peu floue, parce que les données ont été collectées sur plusieurs années, alors que l'océan continue

sans cesse de bouger.

À la suite de WOCE, un autre programme s'est créé. CLIVAR (Climate Variability) avait pour objectif d'affiner cette image floue. Plusieurs projets ont alors été lancés pour étudier les courants dans des zones géographiques « clé » avec l'idée de répéter régulièrement les observations. Nous avons choisi l'océan Atlantique Nord subpolaire et la zone intergyre, où nous présumions une forte variabilité.

C'est comme cela que s'est construit OVIDE, sur une section du Portugal au Groenland, répétée tous les deux ans. Traversée par de nombreux courants remontant vers le nord ou descendant vers le sud, cette section permet de mesurer en particulier le flux de chaleur transporté vers l'Europe par le courant nord-atlantique. Notre observation était intégrée à d'autres programmes internationaux de surveillance hydrographique et géochimique de l'océan et a bénéficié du déploiement de satellites et des flotteurs profiteurs Argo. Cela nous a permis d'avoir de la donnée dans notre zone à des saisons où les bateaux ne peuvent pas naviguer.

À l'origine, quels étaient les objectifs d'OVIDE ?

Pascale Lherminier : Le premier, c'était d'étudier et de suivre les variations de l'AMOC, cette circulation méridienne de retournement en Atlantique, de comprendre les mécanismes et aussi d'aller vérifier si cette circulation verticale se modifiait, si elle ralentissait, comme certains modèles le suggèrent. L'objectif final était de construire une série temporelle précise de l'amplitude de l'AMOC pour comprendre comment cette circulation évolue.

H. M. : Un autre objectif s'est imposé de lui-même sur le cycle carbone, grâce à une collaboration de l'Université de



Vigo et le Conseil supérieur de la recherche scientifique (principal organisme de recherche espagnol). Il s'agissait en particulier de déterminer quelle était la part du carbone anthropique absorbée par l'océan.

Enfin, le dernier objectif était d'étudier les propriétés des masses d'eau. Comment varient-elles ? Quels sont les mécanismes générateurs de leur mouvement ? Aujourd'hui, nous faisons un focus resserré sur la circulation profonde que l'on connaissait très peu, notamment grâce aux nouveaux moyens déployés par le programme DeepArgo.

P. L. : Et il y a eu le programme GEOTRACES, auquel OVIDE a participé en 2014 en menant la campagne GEOVIDE. Nous souhaitons faire un premier état des lieux des paramètres biogéochimiques de l'océan mondial. Nous nous sommes intéressés ici à des traceurs extrêmement fins : l'aluminium, le manganèse, le cuivre, les isotopes du fer, des éléments essentiels à la vie. Nous avons besoin d'une technologie permettant d'aller jusqu'au nanomole par litre, et c'est grâce aux avancées technologiques que l'on a pu mettre en place ce programme. Nous avons fait ces mesures sur la section OVIDE ainsi que sur une autre section qui traversait la mer du Labrador.

Comment collecter toutes ces données au cours de chaque campagne ?

P. L. et H. M. : Navire à l'arrêt, nous utilisons une rosette ou bathysonde, accrochée à un câble électroporteur, pour suivre le signal de l'instrument. Nous la plongeons

à diverses profondeurs, jusqu'au fond. Des instruments nous fournissent en temps réel des profils de température, d'oxygène et de salinité de l'eau en fonction de la pression. Installées sur la rosette, des bouteilles se ferment à des profondeurs données, nous permettant de prélever des échantillons d'eau qu'on analysera ensuite en laboratoire pour y déterminer les traceurs. Ces stations sont effectuées en moyenne tous les 25 milles nautiques (environ 40 kilomètres) sauf lorsqu'il y a des pentes des plateaux continentaux. Là, c'est tous les deux kilomètres parce que nous avons besoin d'un échantillonnage beaucoup plus fin pour déterminer les bons transports de volume de masses d'eau, de nutritifs etc.

Quelles sont les difficultés et les aléas en cours de campagne ?

P. L. : Ce n'est pas toujours simple de faire ces mesures, il faut souvent faire des compromis, surtout lorsqu'il y a de la pluridisciplinarité à bord, comme lors de la campagne GEOVIDE. En physique, on veut aller le plus vite possible, pour avoir une photo instantanée la plus précise possible à un instant T car les courants se déplacent parfois assez vite. On évite donc de s'arrêter trop longtemps dans les zones trop variables. Mais en biogéochimie, on peut rester trois jours sur le même point parce qu'il faut beaucoup d'eau pour avoir des mesures suffisamment fines. La campagne GEOVIDE a duré 45 jours au total, alors que d'habitude, OVIDE dure plutôt 23 jours environ.

Pour mieux planifier la campagne au jour le jour, nous utili-

- sons les prévisions de l'océanographie opérationnelle, semblables aux prévisions météorologiques pour l'océan. Nous recevons celles du centre Copernicus-Mercator de Toulouse, sur 15 jours : elles nous fournissent un état de l'océan, les éventuels passages de front, les tourbillons qui nécessiteraient une adaptation de notre expérience. Cela nous est arrivé lors d'une campagne : nous approchions de la ride de Reykjanes, dans le sud de l'Islande, et les cartes nous alertaient sur un fort coup de vent qui risquait de suspendre nos opérations. Nous voyions clairement que le courant d'Irmingier, de l'autre côté de la ride, était très fort et très variable. Nous avons préféré nous arrêter avant, pour éviter d'avoir à le faire dans une zone trop variable, ce qui aurait faussé notre estimation du débit de ce courant.

"NOUS AVONS RÉUSSI À EXPLIQUER POURQUOI L'AMOC A VARIÉ SUR LES TRENTE DERNIÈRES ANNÉES."

Une fois les données à bord, travaillez-vous dessus en « direct » ?

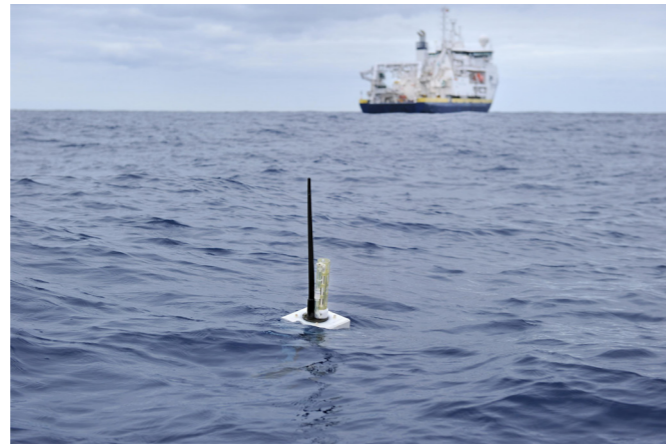
P. L. : Les deux, cela dépend. Tout ce qui est chimie simple se fait à bord, c'est-à-dire l'oxygène, le cycle du carbone, la salinité, les nutritifs. Mais dès que nous avons besoin d'un spectromètre de masse (appareil permettant de détecter et d'identifier des molécules d'intérêt en fonction de leur masse), nous le faisons à terre. Un échantillon analysé frais en campagne est toujours mieux qu'un échantillon conservé.

H. M. : Nous déterminons les éléments présents dans les échantillons à bord autant que faire se peut, mais l'analyse scientifique poussée se fait vraiment à terre. L'essentiel en mer, c'est de vérifier que la donnée acquise est de qualité. Parce qu'il peut toujours y avoir un souci sur les instruments. Ils sont soumis à des pressions importantes, 500 bars parfois !

Comment faites-vous pour mettre en forme, rendre visibles et exploitables toutes ces données ?

H. M. : Nous les intégrons dans des modélisations pour avoir une image de l'océan au moment de la campagne, avec les données des flotteurs profleurs Argo et des satellites.

Ces dernières sont très utiles car nous avons ainsi des informations même lors des saisons hivernales lorsque les campagnes sont impossibles. Mais elles peuvent avoir des anomalies, un capteur peut dysfonctionner sur le bateau, les flotteurs être perturbés par les conditions de mer. Nous pouvons aussi faire des erreurs de calculs au moment de travailler sur ces données. Ici, nos données OVIDE servent de points de référence pour voir s'il n'y a pas d'incohérence. C'est ainsi qu'on a pu faire la reconstruction de la variabilité de l'AMOC et obtenir une série temporelle de presque trente ans, à une résolution mensuelle.



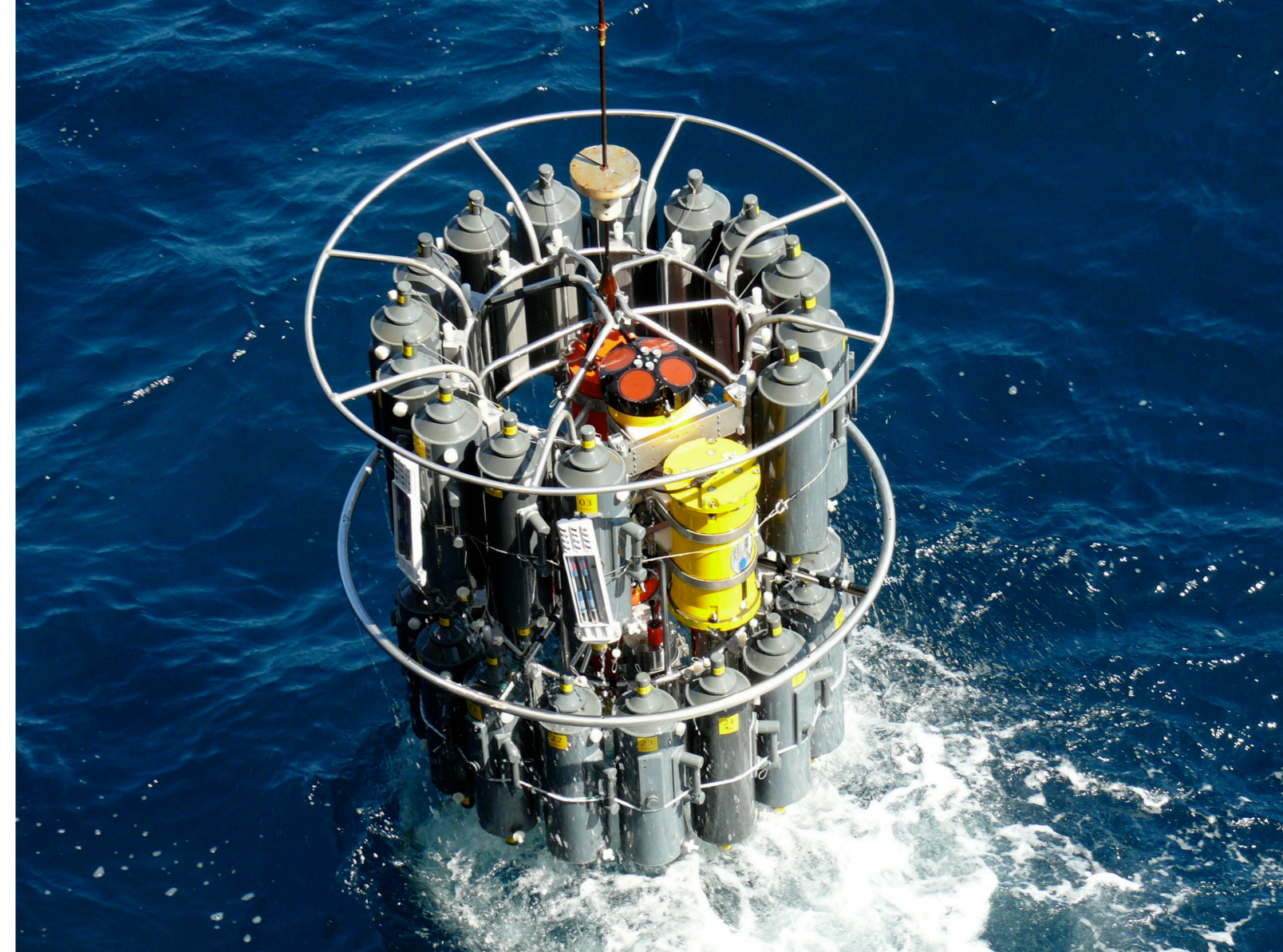
Quels sont les objectifs de la campagne 2025, outre les trois évoqués ?

H. M. : Nous allons essayer de comprendre le rôle de la circulation profonde dans l'export, vers le sud, du carbone anthropique qui a convecté dans nos zones. C'est-à-dire son retour. Un autre objectif, c'est de voir si les vagues de chaleur de ces dernières années, notamment celle de l'an dernier, ont eu un impact sur les propriétés des masses d'eau.

Comment et pourquoi faire perdurer un tel programme ?

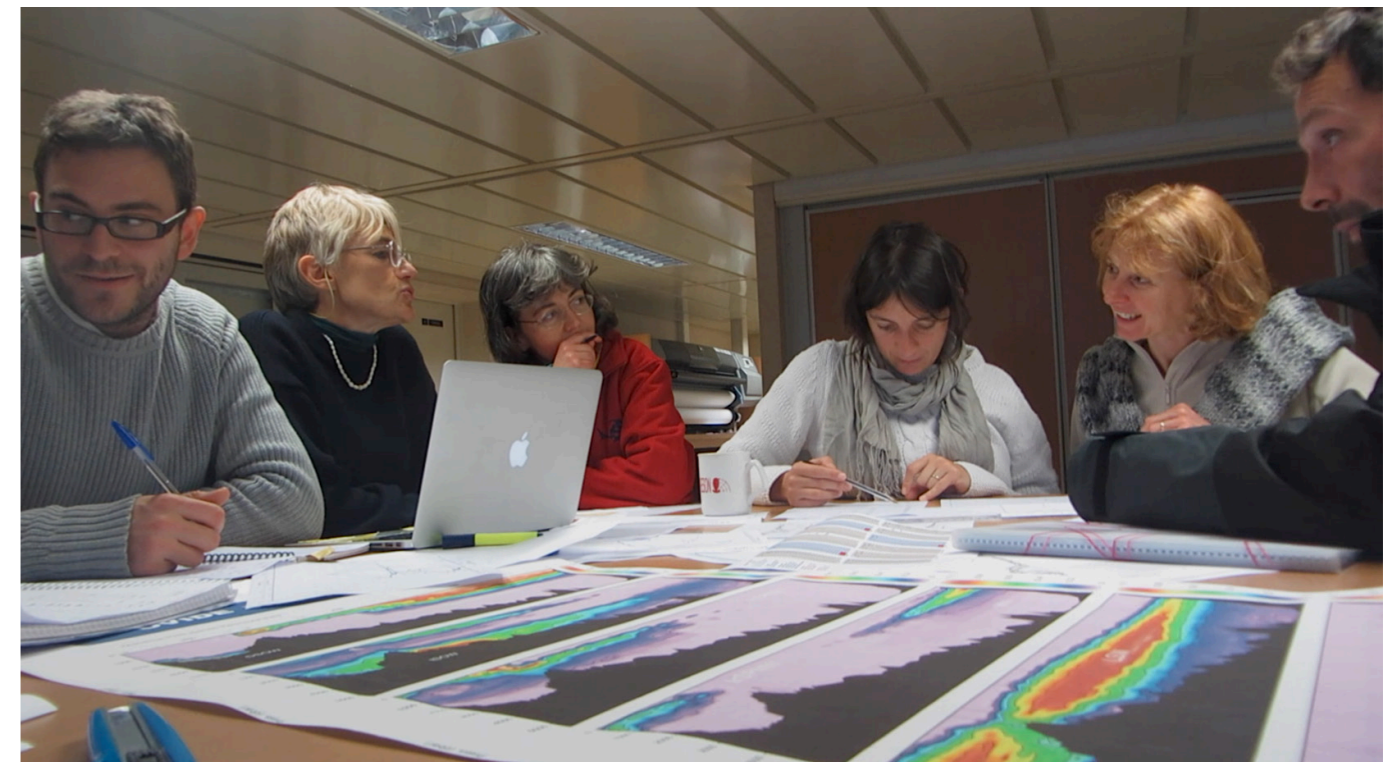
H. M. : Nous avons réussi à expliquer pourquoi l'AMOC a varié sur les trente dernières années. Mais il nous faut des séries plus longues parce que les modèles de climat qui prévoient une diminution de l'AMOC se basent sur une période de cent ans. Actuellement, en l'état des connaissances, nous n'avons pas de consensus scientifique ; on ne peut affirmer qu'une diminution de l'AMOC est due aux activités humaines. Donc nous devons poursuivre l'observation. Nous faisons de la science de qualité, nos campagnes et nos données ont été très bien évaluées. D'ailleurs notre programme attire toujours de nouveaux chercheurs sur ces thématiques avec de nouveaux questionnements scientifiques.

P. L. : Depuis plusieurs campagnes, nous alternons entre la France et l'Espagne pour l'organisation logistique et l'affrètement du navire. Cette répartition de l'effort entre les deux pays est très appréciée. La pérennité du projet tient aussi de cette collaboration.



La rosette est relevée et les échantillons d'eau de mer prélevés seront récupérés et vérifiés par les scientifiques.

Réunion scientifique à bord du Pourquoi Pas? Campagne OVIDE 2018



LES RÉSULTATS SCIENTIFIQUES D'OVIDE

par Maud Lénée-Corrèze

Dès le deuxième rapport du GIEC, publié en 1995, les scientifiques avaient identifié l'éventualité du ralentissement ou de l'arrêt de la circulation thermohaline océanique, du fait du changement climatique. Le troisième rapport ne l'envisage pas pour le XXI^e siècle ; mais il redoute qu'après 2100, l'arrêt de la circulation puisse advenir de « manière irréversible, dans les deux hémisphères ». Dans le rapport le plus récent, le GIEC est plus précis : il prévoit désormais un ralentissement de l'AMOC au cours de ce siècle. C'est notamment pour valider cette hypothèse des modèles que les programmes tels qu'OVIDE et RAPID, sur le 26^e parallèle Nord, ont été mis en place.

20 ans D'OVIDE

"Vingt ans d'OVIDE nous ont permis de voir que le courant nord-atlantique varie beaucoup, précise Herlé Mercier, et que la plus forte variabilité se trouve sur l'échelle de temps saisonnière."

Cette variabilité serait liée à la variation du champ de densité de l'eau, c'est-à-dire aux différences de densité entre les différentes masses d'eau. Mais **"pour l'instant, nous sommes encore incapables de dire s'il y a une tendance à la baisse ou à la hausse de l'AMOC dans notre zone."**

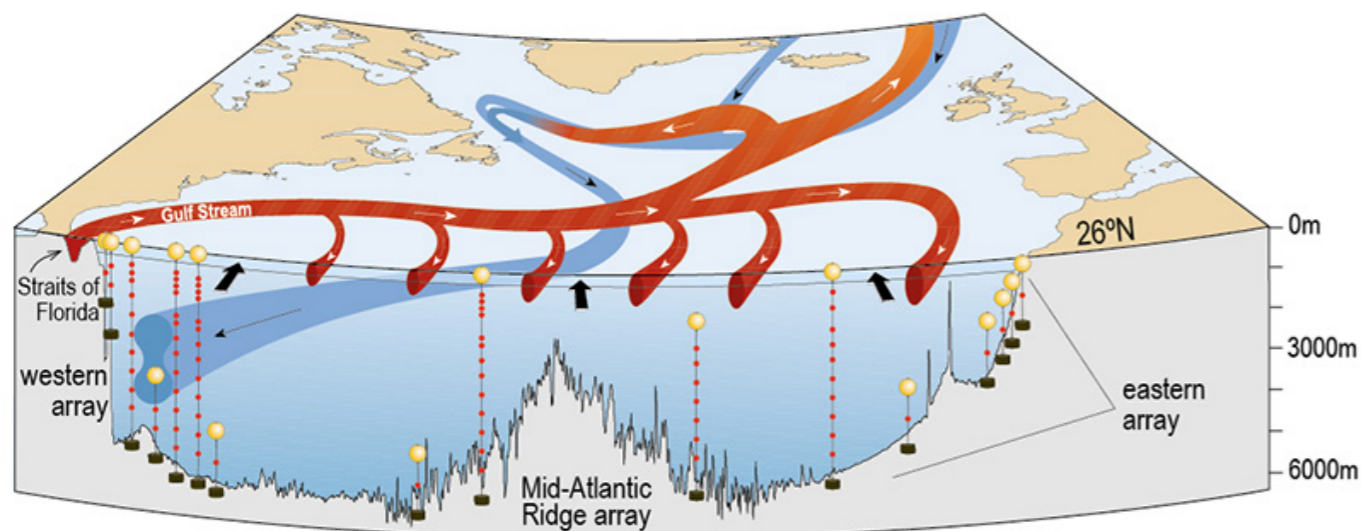


Schéma de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique avec les bouées RAPID. Crédit : NOC

Si les observations d'OVIDE n'ont pas pu déterminer un ralentissement comme l'a fait le programme RAPID, elles ont cependant beaucoup éclairé les connaissances sur le cycle du carbone. À commencer par ce constat : c'est dans l'Atlantique subtropical que l'excès de CO₂ d'origine anthropique est absorbé par la pompe de carbone avec le plus d'efficacité. Il est ensuite transporté par la branche haute de l'AMOC (le courant nord-atlantique) jusqu'à nos latitudes.

« Et nous avons observé au cours des campagnes OVIDE une accélération de l'incorporation du carbone anthropique dans le gyre subpolaire entre les années 2000 et 2018, liée notamment à une phase positive de l'oscillation nord-atlantique, c'est-à-dire avec des tempêtes plus fréquentes et intenses, favorisant les échanges air/mer », précise Herlé Mercier.

Une hausse de la température de 0,5 degrés dans les courants profonds

Les scientifiques ont aussi observé une augmentation de 0,5 degrés Celsius de la température des masses d'eau formées par la convection, c'est-à-dire l'enfouissement d'une eau devenue plus dense, au niveau du Groenland, en mers d'Irminger et du Labrador. « C'est un chiffre très élevé pour l'océan, 0,5 degrés, car l'océan a une très forte capacité calorifique⁽¹⁾ », affirme Pascale Lherminier.

Un constat qui pour l'instant n'a pas de conséquence sur la circulation thermohaline. « Nous pensions que le réchauffement allait peut-être diminuer la convection profonde, mais pour l'instant, nous n'avons pas observé ce changement, précise Herlé Mercier. Les eaux convectent toujours jusqu'à 2000 mètres de profondeur, mais elles sont seulement plus chaudes. Cela signifie que les pertes de chaleur à l'origine de cette convection ont été suffisantes : on est parti d'une masse d'eau plus chaude, mais on a perdu suffisamment de chaleur pour qu'elle s'enfouisse à 2000 mètres. »

Et Pascale Lherminier d'ajouter : « Tout change ensemble, et comme la circulation océanique tire son énergie des contrastes, si les contrastes restent les mêmes, alors nous aurons une circulation similaire, mais juste avec des propriétés différentes. Mais ici, on voit bien la signature du changement anthropique. »

Même sans "tipping point", un ralentissement aurait des conséquences

Quid alors de l'éventualité d'un effondrement de l'AMOC, évoqué par le GIEC ?

Afin d'affiner les prévisions, les scientifiques se concentrent sur la réaction de la circulation océanique soumise à un fort apport d'eau douce, issue de la fonte de la glace de mer et de la calotte groenlandaise. La fonte augmentera la quantité d'eau douce dans les masses d'eau, ce qui pourrait donc diminuer la convection profonde et ainsi modifier l'ampleur de

l'AMOC, voire atteindre ce qu'on appelle le point de bascule, le tipping point.

« Atteindre un tipping point, c'est plonger dans un autre état, sans pouvoir revenir à l'état initial par le même chemin, ajoute Herlé Mercier. Et pour l'anticiper, cela demande d'utiliser une grande variété de modèles ; des modèles conceptuels jusqu'aux modèles de climat les plus complexes, pouvant se référer aux données OVIDE. » Aux modèles qui ont atteint ce "tipping point", il a fallu huit fois la masse du Groenland actuel.

Cela dit, un ralentissement sensible provoquerait déjà des changements pour le climat européen : certains scénarios prévoient un refroidissement au Nord-Ouest de l'Europe car l'AMOC apporte normalement de la chaleur à ces régions. Quand l'équilibre est rompu, même faiblement, les conséquences sont vite perceptibles.

⁽¹⁾ La capacité calorifique ou thermique d'un élément quantifie sa capacité à absorber ou à restituer son énergie lorsque sa température évolue. L'océan a, comme l'eau, une capacité calorifique importante, le rendant capable d'absorber beaucoup d'énergie, ici de la chaleur, avant de voir la température de ses masses d'eau augmenter.

UN RALENTISSEMENT

Un ralentissement au niveau du 26^e parallèle Nord

Si la section OVIDE ne donne pas encore de signes d'un ralentissement de l'AMOC, la section du programme RAPID, elle, en fournit : les campagnes effectuées durant la décennie 2004-2014 ont identifié un ralentissement d'environ 0,5 Sv par an, soit 500 000 mètres cubes par seconde (deux fois plus que le débit du fleuve Amazonie !), sachant que le débit au 26^e parallèle Nord est d'environ 18,75 Sv.

« Durant l'hiver 2009-2010, il y a eu un déclin totalement inattendu de l'AMOC d'environ 30 pour cent. Le déclin a aussi été observé dans les données Argo et celles des satellites altimétriques. L'événement coïncide avec une phase négative de l'oscillation nord-atlantique et il était aussi associé à un hiver inhabituellement froid », peut-on lire en résumé sur le site du programme RAPID.

Dans une étude récente, les chercheurs « constatent que l'AMOC ne s'affaiblit plus, bien que le transport récent [le débit, ndr] ne soit pas supérieur à la moyenne à long terme. » Mais « en utilisant la durée totale de l'enregistrement, nous (...) constatons que le déclin précédemment identifié comme une tendance (...) ne s'est pas encore inversé », concluent les chercheurs.

CHAPITRE 3

page 36

LES GRANDES DATES DE L'OBSERVATION DES COURANTS

par Carole Saout-Grit

page 38

L'Océan AUSTRAL, grand maître DES COURANTS marins au PÔLE SUD

par Laurie Henry

page 42

La TURBULENCE océanique : influence MICROSCOPIQUE ET IMPACT MAJEUR

par Laurie Henry

LES COURANTS marins CHEFS D'ORCHESTRE DU CLIMAT

Les grandes dates de l'observation des courants

par Carole Saout-Grit

1725

Luigi Fernando Marsilli publie « Histoire physique de la Mer », premier ouvrage d'océanographie physique et biologique.

1769

Benjamin Franklin établit la première carte du Gulf Stream.

1872-1876

Plus grande campagne océanographique autour du monde à bord du navire Challenger. 713 jours de mer, 362 stations de mesure, 7000 espèces récoltées dont 1500 nouvelles, 50 rapports écrits et la découverte d'une fosse de 8815 mètres de profondeur près des îles Mariannes dans l'océan Pacifique.

1902-1936

Premières grandes expéditions polaires : Jean-Baptiste Charcot cartographie plus de 2000 kms de côtes en Antarctique et sillonne les pôles nord et sud pendant 12 expéditions.



1905

Première carte bathymétrique des océans dressée par S.A.S. le Prince Albert 1er de Monaco.

1925-1927

Le navire allemand Météor réalise la première étude hydrographique de l'Atlantique Sud grâce à son sondeur acoustique.

1955

Premières mesures de courant par l'anglais John Swallow à bord du RRS Discovery II. Mesures de courant réalisées par flotteur plongé à profondeur fixe.

1957-1958

L'Année Géophysique Internationale permet la collecte de plus de 6600 profils et marque le début de l'ère spatiale 1960 - Découverte de la fosse des Mariannes dans le Pacifique à 10916m par Jacques Piccard et Don Walsh à bord du Trieste.

1961

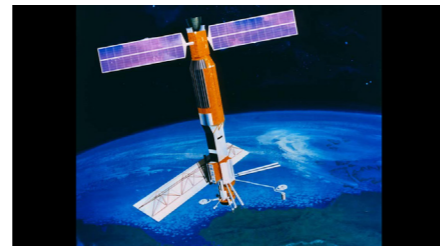
Naissance de la Commission intergouvernementale océanographique (CIO) sous l'égide de l'UNESCO. Premiers travaux collaboratifs pour l'édition d'un Atlas mondial des océans, d'un projet global d'analyse des données océanographiques (Global Ocean Data Analysis Project) et la mise en place d'un réseau d'aires marines protégées.

1974

Naissance du programme international DBCP (Data Buoy Cooperation Panel) par UNESCO-IOC. Premier programme pour l'observation global de l'océan utilisant des données de bouées dérivantes mesurant les conditions océaniques et atmosphériques.

1978

Lancement du premier satellite SEASAT dédié à l'observation de l'océan.



1979

Naissance du système Argos de collecte de données et de localisation par satellite à couverture mondiale, fruit d'une coopération CNES, NASA et NOAA.

1982

Naissance du programme TAO (Tropical Atmosphere Ocean Project) par la NOAA. Installation de réseaux de bouées ancrées dans les zones tropicales visant à fournir des données temps réel pour la recherche sur le climat et les prévisions.

1985

Naissance des programmes internationaux Tropical Ocean Global Atmosphere pour l'étude des océans sous les tropiques et leurs relations avec l'atmosphère, et Global Sea Level Observing System pour la surveillance de l'élévation du niveau de la mer.

1985

Naissance du GOOS, système global d'observation de l'océan, par UNESCO-IOC.

1991-2002

Programme international WOCE. Répétition de sections hydrographiques et collecte de données de pression, température, salinité et oxygène entre la surface et 6000 mètres de profondeur avec une précision sans précédent.

1992

Lancements des satellites océanographiques TOPEX-Poséidon et JASON par la NASA et le CNES

1995

Naissance de Mercator Ocean à Toulouse. Une trentaine de scientifiques (océanographes, météorologues, mathématiciens et ingénieurs) développent les outils pour décrire et prévoir l'océan de façon opérationnelle.

1996

Naissance du Global Drifter Program (GDP).

1997

Mise en place de l'observatoire PIRATA "Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic" dédié à l'étude des interactions océan-atmosphère dans l'Atlantique tropical et contribuant au programme TAO, soutenu par la France, le Brésil et les Etats-Unis. Un réseau maintenu de 18 bouées météo-océaniques et 3 mouillages courantométriques pour la mesure des courants le long de l'équateur.

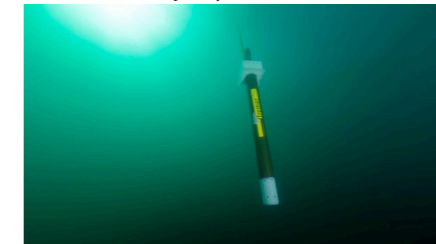
1998

Naissance du programme international Tropical Moored Buoy Implementation Panel, auquel contribue PIRATA.

2000

Naissance du programme international ARGO par UNESCO-IOC. Consortium de 30 pays, pour le déploiement de 3000 flotteurs sous-marins autonomes effectuant chacun, tous les 10 jours des profils de pression, tempéra-

ture et salinité de 2000 mètres de profondeur à la surface. Naissance du portail de données marines oceanSITES pour la coordination d'un système de stations de référence à long terme en eaux profondes, mesurant des dizaines de variables et surveillant toute la profondeur de l'océan, depuis les interactions air-mer jusqu'à 5 000 mètres.



2001

Naissance du programme SOT (Ship Observations Team) pour la collecte de données durables (plus de 100 ans), impliquant des navires d'observation volontaires et des navires d'opportunité

2005

Premier bulletin de prévision océanique couvrant l'ensemble du globe, publié par Mercator. Déploiement de la 1250ème bouée dérivante du programme DBCP.

2006

Lancement par le CNES du satellite Metop-A embarquant le nouvel instrument Argos-3 de télécommunication des données.

2007

Naissance du programme international Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program pour la coordination d'un réseau de sections hydrographiques à l'échelle mondiale dans le cadre du système mondial d'observation de l'océan et du climat, y compris l'océanographie physique, le cycle du carbone, la biogéochimie marine et les écosystèmes.

2007-2009

Années polaires internationales, ef-

fort international de collaboration pour l'étude des régions polaires pour mieux comprendre le rôle moteur des régions polaires dans la régulation du climat terrestre

2009-2015

Système européen de prévisions de l'océan MyOcean pour fournir des informations sur les océans et aider en particulier à la lutte contre les marées noires, à la surveillance des glaces et à la gestion des ressources marines

2014

Naissance du programme européen COPERNICUS de surveillance opérationnelle des océans. Création d'EURO-ARGO, Infrastructure de recherche européenne pour Argo.

2016

Lancement du programme OceanGliders pour une coordination internationale de l'observation des océans par des planeurs, véhicules sous-marins autonomes effectuant des trajectoires en dents de scie depuis la surface jusqu'à des profondeurs de 1000 m, le long d'itinéraires programmables.

2022

Lancement par le CNES et la NASA du satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography) pour l'étude de la topographie des océans et des eaux de surface continentales.

2023

Lancement par la NASA du satellite PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) pour l'étude du phytoplancton, des aérosols et des nuages.



L'océan AUSTRAL, grand maître des courants marins au pôle sud

par Laurie Henry

Au pôle Sud, la régulation du climat terrestre et le cycle global du carbone sont influencés de manière significative par la dynamique de l'océan Austral. Connu pour être le moins exploré, il encercle le continent Antarctique sans discontinuer et est parcouru par le Courant Circumpolaire Antarctique, le plus puissant de notre planète. Et parce qu'il communique au nord avec les trois grands océans Atlantique, Indien et Pacifique, il joue un rôle clé dans les mécanismes climatiques globaux. Surveiller ses variations sur le long-terme est un véritable enjeu pour anticiper les changements futurs.

L'océan Austral est le plus jeune des bassins océaniques, formé il y a environ 34 millions d'années suite à la séparation de l'Antarctique et de l'Amérique du Sud. Contrairement aux autres bassins océaniques du globe qui sont tous limités par des terres, il est le seul à encercler un continent, l'Antarctique. Cet « anneau » océanique constitue environ 20% de la surface océanique mondiale et représente l'unique grande connexion entre les trois bassins Atlantique, Indien et Pacifique.

Éloigné et isolé au pôle Sud, l'océan Austral est terriblement redouté par les marins. Les conditions climatiques qui y règnent sont extrêmes. Les vents violents qui y soufflent, notamment les « 40èmes rugissants » et les « 50èmes hurlants », sont des vents puissants qui peuvent atteindre des vitesses vertigineuses et rendre la navigation particulièrement périlleuse.

Une région clé pour la formation et la transformation des masses d'eaux

Les fortes interactions entre l'air, la mer et la glace font de cet océan une région clé pour la formation et la transformation des masses d'eaux. Elles sont en effet les moteurs de la mise en mouvement de boucles de circulation océanique dans l'hémisphère sud, maillons essentiels à la circulation thermohaline globale. Celle qui rend possible le transfert d'anomalies océaniques et climatiques des zones superficielles vers les zones intermédiaires et profondes sur des échelles de temps relativement longues.

Considéré sur la verticale, l'océan austral peut être vu comme un millefeuille de trois zones distinctes : la couche de surface et sa couche de mélange qui sont en interaction directe et constante avec l'atmosphère ; la couche intermédiaire, associée à une boucle de circulation dite « supérieure » formée des eaux Antarctiques intermédiaires (AAIW) et Subantarctiques (SAMW) exportées vers le nord ; enfin la couche dite « profonde », associée à la formation et à l'export des eaux abyssales (AABW) autour de l'Antarctique, ainsi qu'à la modification dans l'océan Austral des eaux profondes provenant de

l'Atlantique nord (NADW).

Sous l'effet de conditions atmosphériques et de vents intenses en surface, la couche de mélange océanique peut s'approfondir si fortement que les masses d'eau de surface et intermédiaires sont entraînées, avec leurs caractéristiques physico-chimiques, de la surface vers les très grandes profondeurs par phénomène de subduction.

En complément, des phénomènes de convection sont créés par des polynies, des ouvertures créées dans la banquise par des vents catabatiques qui dévalent les pentes de l'Antarctique à des vitesses pouvant dépasser les 300 km/h. Ces vents froids et rapides repoussent la glace de mer, provoquant des ouvertures où l'eau de mer exposée perd rapidement sa chaleur et augmente en salinité, devenant suffisamment dense pour plonger à la fois sur le plateau Antarctique près des côtes et parfois plus au large.

Les masses d'eaux profondes sont également formées par des interactions énergétiques complexes entre air, mer et glaces. Au total, la formation d'eaux denses dans les régions australes est particulièrement intense dans trois régions particulières : la mer de Ross, la mer de Weddell et au large de la Terre-Adélie.

Le mécanisme de subduction et de plongées d'eaux entre la surface et les grandes profondeurs entraîne une ventilation naturelle de la thermocline⁽¹⁾, qui va jusqu'à des échelles de temps décennales. Au cœur du pôle sud, l'océan Austral est une poulie centrale de connexion à la circulation thermohaline globale, de la surface jusqu'aux plus grandes profondeurs et d'est en ouest sans interruption.

En Atlantique Sud, la circulation baptisée SAMOC (South atlantic meridional overturning circulation) assure les échanges permanents entre les eaux profondes provenant de l'Atlantique Nord et redistribuées vers les bassins Indiens ou Pacifique, et entre le courant circumpolaire antarctique, les masses d'eaux formées ou transformées dans l'océan Austral et celles provenant des bassins (Indien ou Pacifique) et retransférées vers l'Atlantique Nord (par la dynamique du courant des Aiguilles

ou celle du Cap Horn).

Le courant Circumpolaire Antarctique : le plus puissant de la planète

Le courant Circumpolaire Antarctique (CCA) est le plus puissant de notre planète. Il anime l'océan Austral d'ouest en est dans un flux ininterrompu, circulant sans entrave autour de l'Antarctique. Aucune terre à cette latitude ne bloque ou altère son parcours. Son débit atteint 134 Sv à travers le passage de Drake au sud du Cap Horn et plus de 150 Sv au sud de la Tasmanie, soit plus de cent fois le débit de l'ensemble des fleuves du monde !

Dans les eaux antarctiques, les masses volumiques varient très peu avec la profondeur, comparativement aux régions tropicales ou subtropicales, ce qui fait qu'on y trouve des courants qui s'étendent très profondément sur la verticale. Ceci explique que le CCA déplace un volume d'eau sur plus de 2000 mètres de profondeur, avec des vitesses de surface comparables à celles des autres courants de la planète.

La forme annulaire du CCA et la liaison permanente entre les principaux océans du globe permettent la mise en place d'une circulation thermohaline globale qui contrôle les redistributions de chaleur, de température, de salinité, de nutriments et autres propriétés physico-chimiques contrôlant le climat à des échelles interannuelles. C'est ainsi que les eaux intermédiaires (AAIW et SAMW principalement) froides, peu salées et riches en oxygène, sont modifiées au cours de leurs trajets au sein de la SAMOC et exportées soit vers les tropiques, soit dans l'océan Austral vers l'est par l'ACC. Par ces mouvements, des anomalies climatiques formées dans un bassin peuvent donc être transportées vers un autre bassin ou d'autres régions particulièrement lointaines du globe et y produire des effets indirects.

Un océan sous très haute surveillance

L'existence d'un océan « annulaire » au pôle sud n'a été mise au jour qu'au début du XVIème siècle, à l'époque de



Le navire océanographique français Marion Dufresne en pleine tempête, fait route vers l'océan Austral pour une campagne océanographique
© Sabrina Speich, LMD-ENS

Magellan qui découvrit ce détroit éponyme, en 1520. Ont suivi les premières expéditions dans l'océan Austral : Francis Drake en 1578 ; Abel Tasman, en 1642 ; Halley, en 1700 ; Kerguelen-Tremarac et Cook, en 1772, Weddell en 1823. Chacun ayant laissé son nom à de nombreux passages mythiques de ces mers du sud.

L'océanographie en Antarctique a fait ses premiers pas à la fin du XIX^{ème} siècle, avec les campagnes anglaises du Challenger, en 1873 ; ou belges du Belgica en 1897. Ces dernières ont conclu le premier hivernage sur le continent Antarctique. Des mesures hydrologiques régulières n'ont ensuite débuté qu'au début du XX^e siècle, grâce aux travaux de scientifiques anglais complétés par les équipes françaises du navire Commandant Charcot, et par celles norvégiennes du Norvegia ou encore allemandes du Meteor.

Mais il faudra attendre les années 1960 et l'avènement de nouvelles technologies pour entreprendre une véritable exploration de cet océan Austral et commencer à mettre en lumière sa complexité. En 1957, l'Année Géophysique Internationale (AGI) contribuera à multiplier les efforts de recherche au pôle sud, permettant notamment 52 voyages du navire américain Eltanin, entre 1962 et 1972. L'océan Austral se révèle alors au travers du premier atlas réunissant des cartes de ses propriétés hydrologiques à différentes profondeurs.

L'ère moderne de l'exploration océanographique qui suit - avec son lot de nouvelles données satellitaires offrant des vues du ciel et des dynamiques océaniques de surface - sera alors une formidable ressource de mesures précises et fréquentes de l'hydrologie, des courants et de l'extension de la banquise dans les terres australes.

En particulier, au début des années 1990, le réseau d'observation Subantarctique et Antarctique du niveau de la mer (ROSAME) du laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS), voit le jour pour déployer des réseaux de maré-

graphes. Placés stratégiquement, ils surveilleront continuellement l'ACC, en particulier des zones critiques comme le passage de Drake.

Dans cette dynamique, le programme international ARGO permet, à partir de 1999, des observations in situ révolutionnaires grâce à la mise en place d'un réseau global de flotteurs profilants autonomes. Ils mesurent la température, la salinité, et d'autres paramètres physico-chimiques ; et ce systématiquement de la surface jusqu'à 2000 mètres de profondeur. Ces flotteurs Argo, dérivant en toutes saisons et dans toutes les régions des mers du sud inexplorées jusqu'alors, offrent, en l'espace de quelques années seulement, des informations précieuses sur les processus océaniques dans l'océan Austral en temps réel et en trois dimensions !

En complément depuis 2004, des initiatives telles que ANIBOS et le projet MEOP (Marine mammals exploring the oceans pole to pole) collectent des données dans les terres australes en utilisant les déplacements de mammifères marins ! Des centaines de phoques, notamment des éléphants de mer, sont équipés par les scientifiques de capteurs CTD (conductivity-temperature-depth) procurant des profils de température et de salinité de l'océan Austral dans des régions souvent inaccessibles par d'autres moyens. Ces mammifères marins, capables de plongées profondes et prolongées, deviennent des observateurs océanographiques mobiles livrant des données précieuses en allant parfois sous la banquise ou au travers de zones sous-polaires. En particulier durant les saisons automnales et hivernales les plus rudes, lorsque les observations sont rares.

L'intégration de toutes ces données dans les modèles numériques constitue chaque jour un progrès majeur dans la prévision des changements océaniques et climatiques. Cette modélisation est essentielle pour anticiper les répercussions futures des changements environnementaux et

pour prévoir des stratégies d'adaptation efficaces. Les données et mesures collectées en mer puis intégrées dans ces modèles offrent ainsi de meilleures prévisions. La surveillance continue et approfondie de cet immense océan Austral est devenue cruciale.

⁽¹⁾ la thermocline est une zone à fort gradient de température qui sépare la couche chaude isotherme de surface (ou couche de mélange) de la couche sous-jacente plus froide

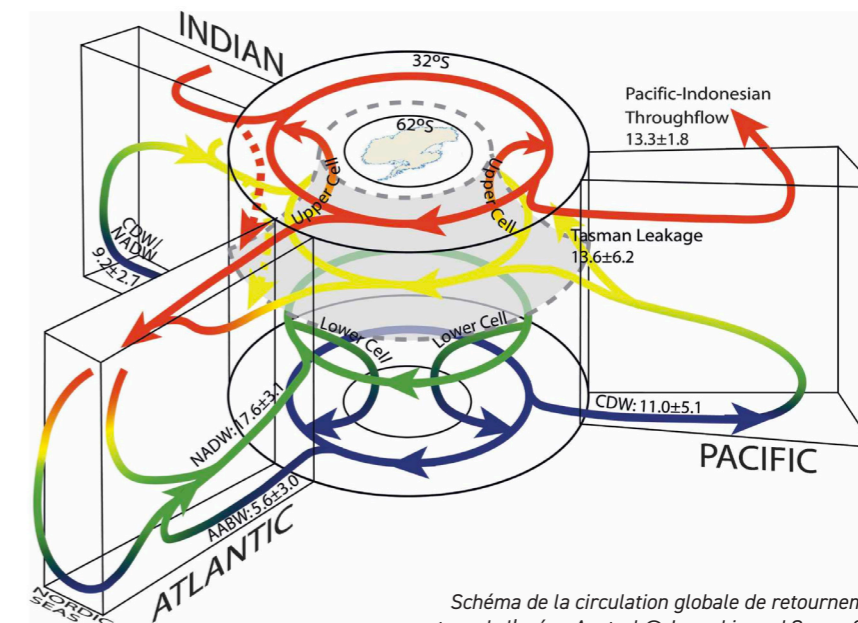
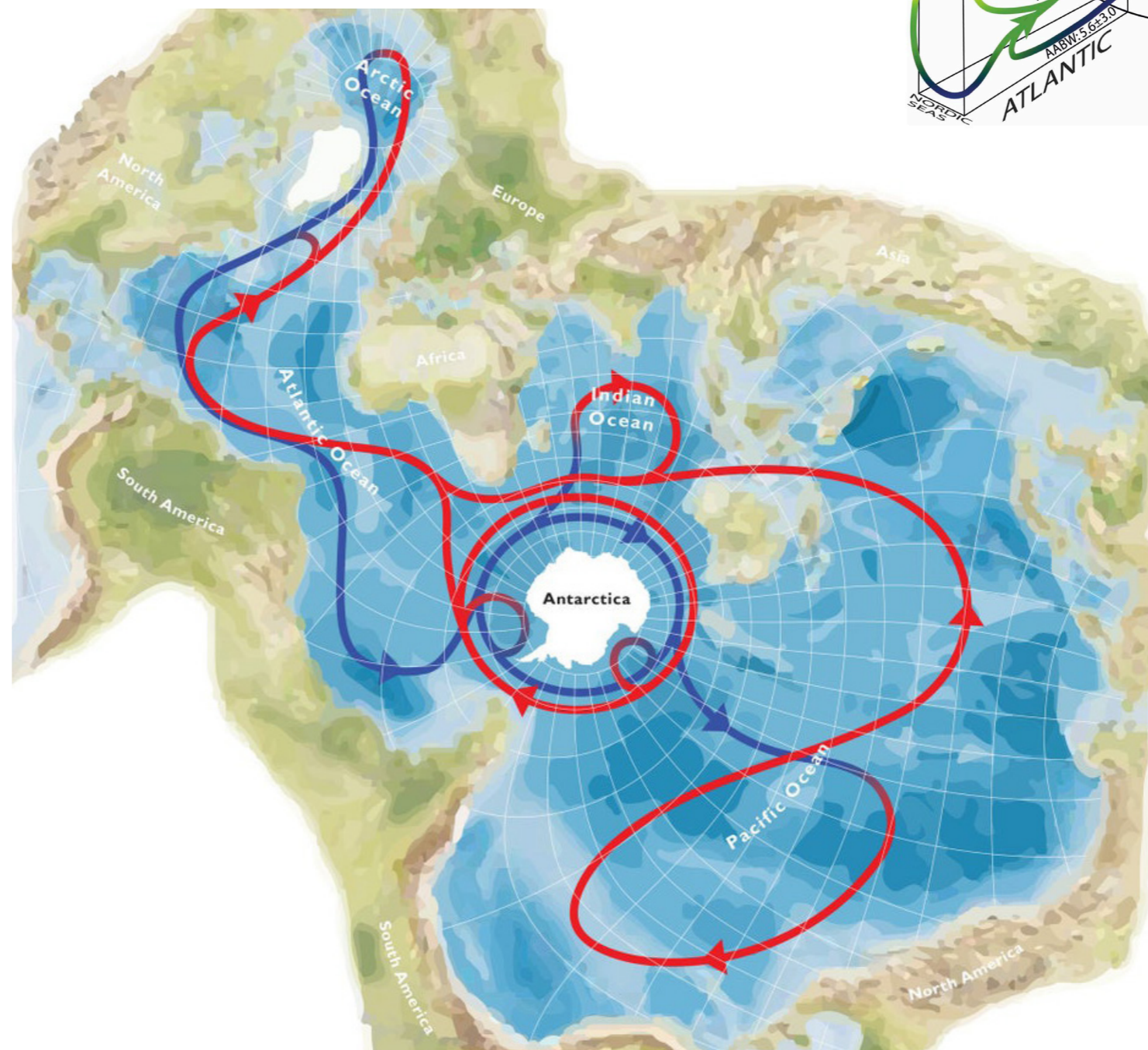


Schéma de la circulation globale de retourment autour de l'océan Austral © Lumpkin and Speer, 2007

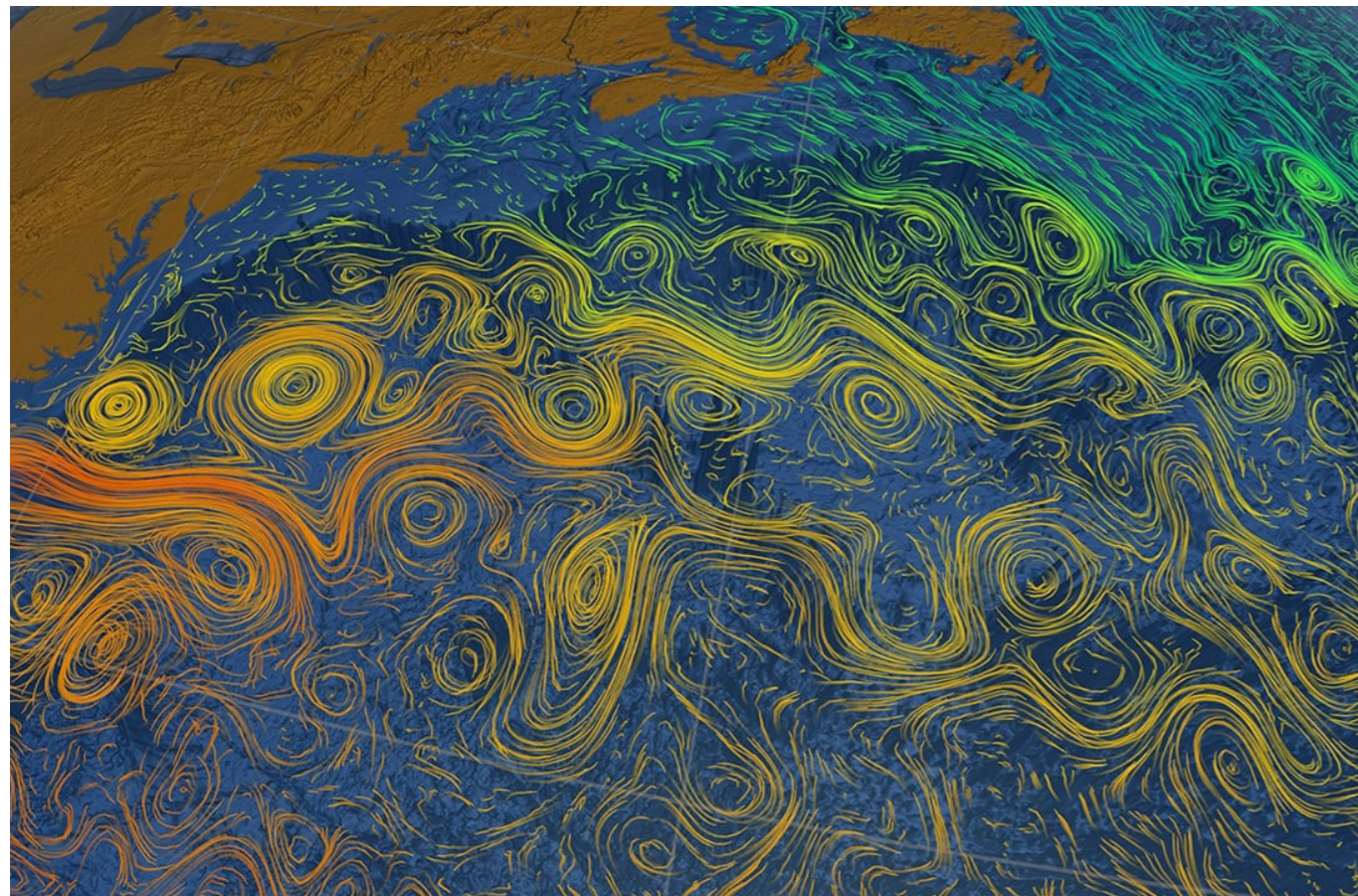
L'océan Austral vu sur une projection ininterrompue de Spilhaus. Contrairement aux projections conventionnelles, celle-ci représente l'océan bordé de terres. La circulation thermohaline mondiale est représentée sous forme de bande dessinée, avec le flux de la couche supérieure en rouge et le flux de la couche inférieure en bleu. Figure tirée de Meredith, 2019.

La TURBULENCE océanique : INFLUENCE MICROSCOPIQUE ET IMPACT MAJEUR

par Laurie Henry

Les scientifiques ont longtemps pensé que l'océan de surface n'était fait que de grands courants réguliers sur plusieurs milliers de kilomètres, à l'image du Gulf Stream. Mais depuis les années 1980 et les avancées de l'observation par satellite, ils savent que l'océan est turbulent et parsemé de nombreuses structures de petites tailles, comparées à l'immensité de l'océan. Très énergétiques, ces structures tourbillonnaires jouent un rôle crucial dans la régulation des climats régionaux et globaux, ainsi que sur la redistribution du CO₂ atmosphérique. Présentes dans tous les bassins océaniques, elles influencent non seulement les courants marins mais aussi la biodiversité marine et les cycles biogéochimiques.

Des dizaines de milliers de courants océaniques sont représentés dans cette visualisation scientifique. (Avec l'aimable autorisation de la NASA)



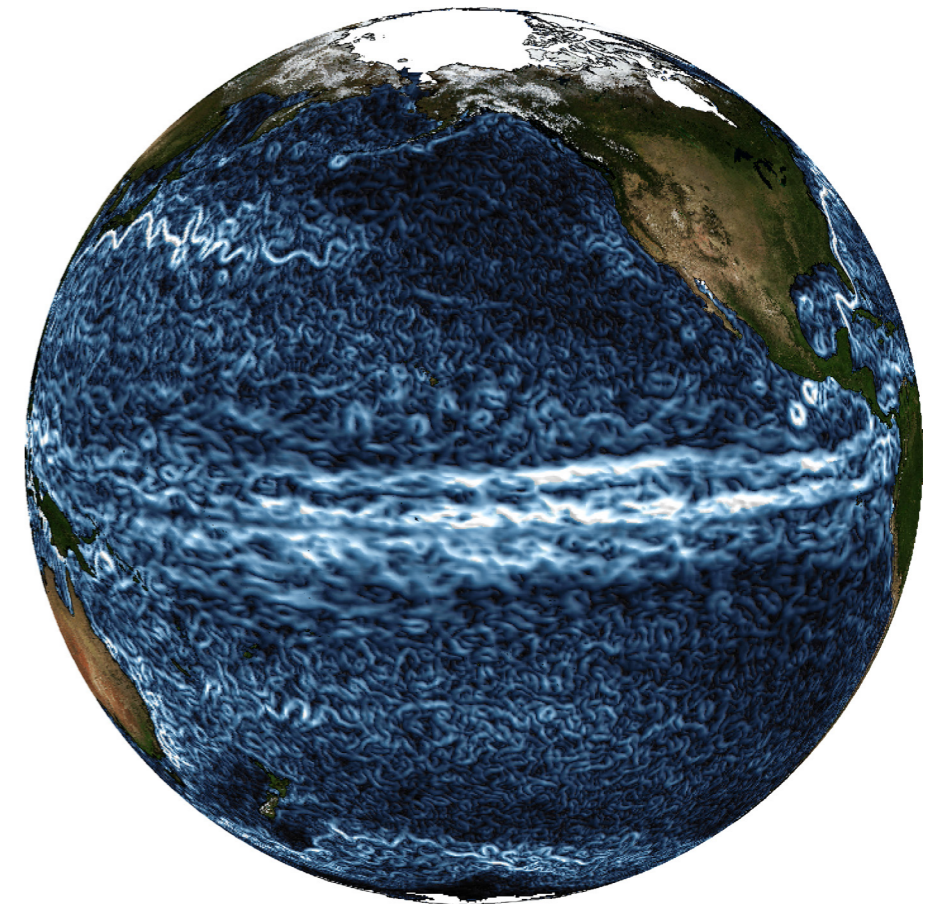
Les structures turbulentes sont des structures dynamiques formées par des mouvements d'eau en rotation qui résultent des variations de pression dans l'océan, à l'instar des systèmes atmosphériques de haute pression (anticycloniques) et de basse pression (cycloniques). Même si elles sont 10 fois plus petites que celles présentes dans l'atmosphère, du fait de la densité de l'eau plus importante que celle de l'air.

En sus de la rotation de la Terre, ces anomalies cycloniques ou anticycloniques océaniques sont principalement activées par les variations de courants, de température et de salinité des masses d'eau. Des différences de densité importantes, atteignant parfois des seuils critiques de rupture, entraînent régulièrement des instabilités dans l'océan qui, conjuguées à la rotation terrestre, déclenchent la naissance de tourbillons océaniques.

Des structures turbulentes océaniques à des échelles multiples

L'océan est parsemé, dans tous les coins du globe, de ces structures turbulentes qui ont des dimensions variées. Les structures dites de « méso-échelle », communément appelées tourbillons, mesurent de 50 à 200 kilomètres de diamètre ; le plus gros jamais observé mesurant 300 kms ! Ces tourbillons peuplent l'ensemble des mers, mais on les retrouve surtout dans les bords ouest des océans. Ils sont particulièrement nombreux et énergétiques dans les forts courants tels le Gulf Stream, le Kuroshio (au Japon) et le courant circumpolaire antarctique, ou encore au large du Cap en Afrique du Sud où se forment les « anneaux des aiguilles ».

Ces structures turbulentes méso-échelles disposent d'une dynamique très énergétique, très rapide et souvent imprévisible. Verticalement, elles peuvent s'étendre jusqu'à 1000 mètres de profondeur, elles ont une influence cruciale sur le mélange et la



Tourbillons de l'Océan Pacifique observés par AVISO - © CNES/CLS 2014

distribution verticale de chaleur et du sel les océans. Par conséquent, elles affectent la stratification et la circulation océanique à grande échelle et sont capitales dans le fonctionnement de la pompe à carbone.

Ces tourbillons méso-échelles se déplacent à très grande vitesse et peuvent parfois interagir entre eux mais de manière non linéaire. Typiquement, deux tourbillons de même nature (deux cyclones par exemple) suffisamment proches l'un de l'autre, vont avoir tendance à fusionner pour donner un tourbillon plus grand.

A l'inverse, l'interaction entre deux tourbillons peut conduire à la formation de structures turbulentes beaucoup plus petites que celles d'origine. Ces nouvelles structures turbulentes

dites de « sous-méso-échelle » mesurent de l'ordre du kilomètre et s'apparentent à des fronts, des filaments ou de petits tourbillons. Elles sont souvent éphémères, avec une durée de vie de quelques jours, ce qui les rend difficiles à observer.

Les fronts localisent souvent de très forts gradients en température et/ou en salinité sur plusieurs kilomètres. Ils constituent de véritables barrières dynamiques de séparation des masses d'eaux, aux propriétés souvent très contrastées.

Verticalement, à la différence des tourbillons, leur présence est faible et se limite à quelques centaines de mètres sous la surface. Par contre, ils sont le siège de vitesses verticales très importantes qui peuvent atteindre 50 à

100 mètres par jour - bien supérieur à la vitesse de remontée d'eau océanique d'un mètre par jour observée en moyenne dans l'océan Pacifique équatorial !

Ainsi, on estime que ces fronts de sous-méso-échelle représentent environ 50% des mouvements verticaux océaniques dans les 500 premiers mètres de l'océan. Ils jouent donc un rôle essentiel dans les mélanges physiques, biologiques et chimiques entre les couches de surface et les couches profondes, voire sur la concentration de micro-déchets.

Un fort impact écologique et climatique

Les tourbillons océaniques exercent une influence notable sur la biodiversité marine, agissant comme des vecteurs dynamiques de redistribution des nutriments et du plancton sur des distances considérables. Grâce à leur

capacité à piéger les masses d'eau en leur sein, les tourbillons n'ont que très peu d'échanges latéraux avec l'extérieur. Ils fonctionnent comme en vase clos pour les écosystèmes planctoniques.

Au sein des tourbillons, les mouvements verticaux ascendants sont essentiels pour fertiliser la surface en apportant des éléments nutritifs depuis le fond. Les structures tourbillonnaires, en capturant des eaux riches en nutriments des profondeurs et en les mélangeant avec des eaux de surface plus pauvres mais illuminées, créent des conditions propices à des floraisons de phytoplancton. Ces explosions de vie végétale soutiennent des chaînes alimentaires entières, qui influencent la distribution et l'abondance des espèces marines à l'échelle locale et régionale.

A l'inverse, les mouvements descendants présents au sein des tourbil-

lons contribuent à l'export du carbone et de matières organiques vers les grandes profondeurs. La capacité des tourbillons à piéger et à transporter du carbone organique en profondeur joue un rôle clé dans les cycles biogéochimiques mondiaux et modère le changement climatique.

Parallèlement dans les régions polaires comme en Arctique, les tourbillons interagissent avec les glaces marines, ce qui influe à la fois sur leur déplacement et sur la dynamique de la banquise, affectant ainsi les climats locaux et globaux par des modifications des échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère.

De nombreux défis pour l'observation

Pour toutes ces raisons, il est donc essentiel de continuer à déployer des moyens d'observer ces structures de petite échelle. Mais du fait de leur taille et de leur caractère souvent éphémère,

les tourbillons océaniques restent difficiles à observer pour les scientifiques.

Nées dans les années 1990, les technologies satellitaires avancées ont été une grande révolution pour les océanographes. Elles ont livré des données sans précédent de variations de la hauteur de la surface de la mer, souvent associées à la présence de structures tourbillonnaires. Les premiers satellites équipés d'altimètres radars, dont le premier TOPEX-POSEIDON lancé en 1992 et ses successeurs JASON (lancés en 2001, 2008 et 2016 - lien AVISO) ont permis d'obtenir des mesures très précises de la topographie de la surface océanique, servant à identifier les reliefs océaniques tels que les bosses et les creux causés par les tourbillons.

En complément, les images thermiques prises par ces satellites aident à détecter les variations de température de surface de la mer, signant la présence de mouvements tourbillonnaires. Plus

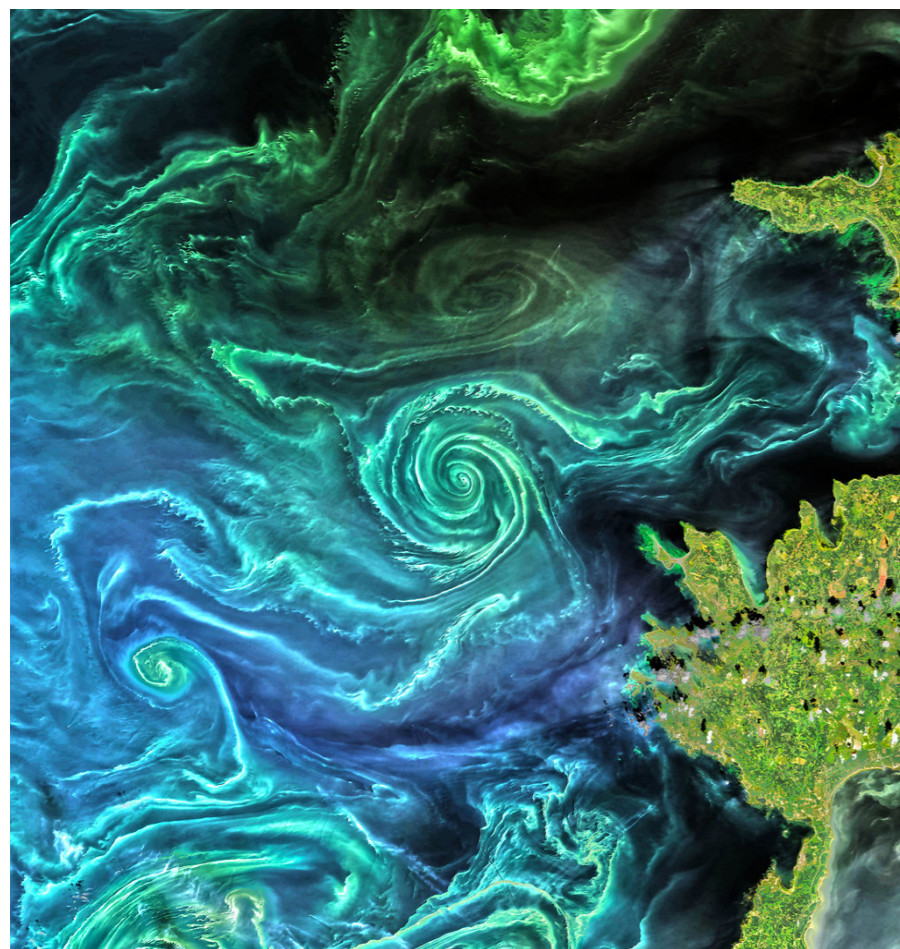
récemment, les données du nouveau satellite SWOT (Surface Water and ocean topography) semblent confirmer aussi les multiples turbulences océaniques. Déployé en 2022, il balaie 90% de la surface du globe avec une résolution du km² pour les mesures de hauteur de la mer.

Ces données vues du ciel sont complétées par un réseau d'observations in situ collectées en mer, indispensables pour la collecte de mesures en-dessous de la toute première couche de surface. Les données de profils de température et de salinité obtenues par le déploiement de sondes CTD (Conductivity-Temperature-Depth) entre 0 et 6000 mètres de profondeur, combinées aux mesures de courants réalisées lors des campagnes scientifiques à des profondeurs variées, ou encore les engins autonomes dérivants ou profilants tels les flotteurs Argo, sont au cœur des avancées technologiques au service de la science. L'ensemble de ces données in-situ se complètent les unes aux

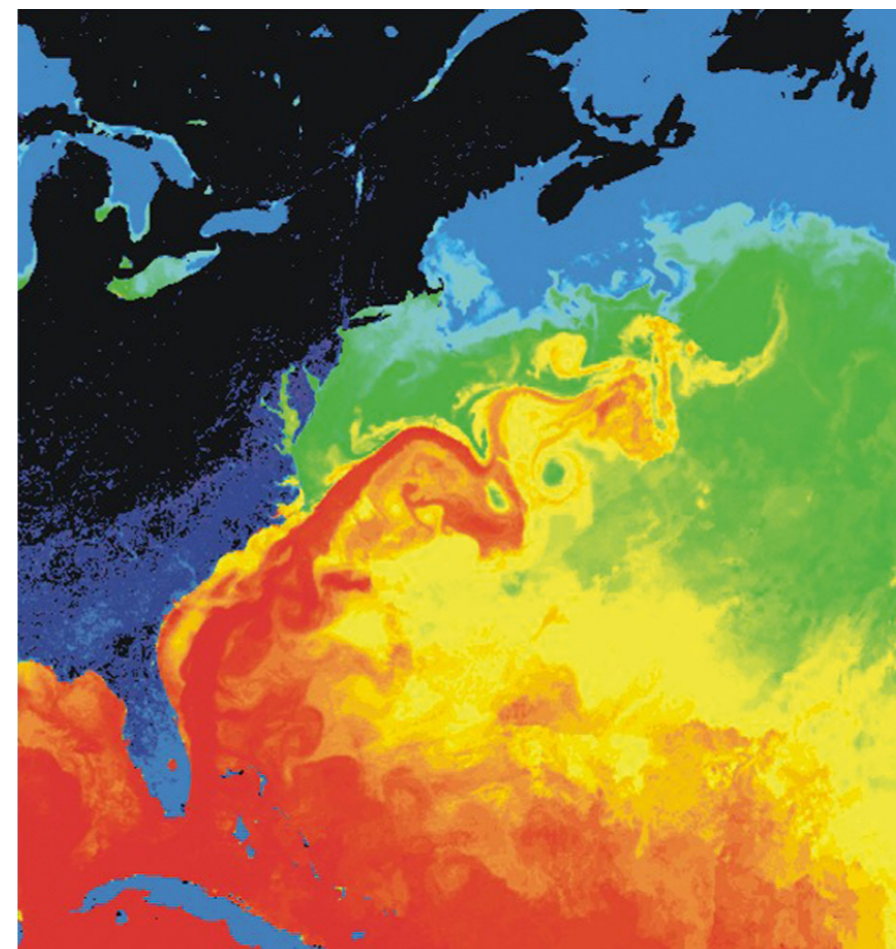
autres, offrant parfois l'opportunité de détecter et de suivre la vie de tourbillons océaniques de petite échelle.

Enfin, les modèles numériques océaniques sont des outils essentiels pour étudier la dynamique océanique et les interactions climatiques. Cependant, ils sont moins efficaces pour simuler précisément les structures turbulentes. La majorité des modèles globaux fonctionne avec une résolution de 10 à 50 kilomètres, très largement insuffisante pour pouvoir capturer les dynamiques fines de méso et sous méso-échelle.

Malgré les nombreux progrès des calculs numériques de ces dernières décennies, les modèles sont donc encore incapables de simuler les échelles les plus fines. Elles sont pourtant essentielles à une représentation correcte du transport vertical de la chaleur ou du carbone, afin d'obtenir le calcul précis du bilan énergétique de la planète.



Vortex observé au cœur d'un bloom phytoplanctonique - ©S.Speich



Vue par satellite du Gulf Stream et de ses tourbillons. Les eaux chaudes sont en rouge, les eaux froides sont en bleu. © NASA

CHAPITRE 4

page 48

L'océan PREMIÈRE VICTIME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

par Marion Durand

page 51

La RESPONSABILITÉ DE L'HOMME EST sans ÉQUIVOQUE

par Marion Durand

page 53

Le RÉCHAUFFEMENT ET La FONTE DES GLACIERS menacent L'AMOC

par Laurie Henry

page 55

"Le changement CLIMATIQUE POURRAIT DÉRÉGLER LA CIRCULATION océanique"

Interview Julie Deshayes, océanographe - propos recueillis
par Marion Durand

page 59

CIRCULATION océanique : ET SI CE GRAND TAPIS ROULANT S'ARRÊTAIT ?

par Marion Durand

CHANGEMENT CLIMATIQUE & CIRCULATION océanique

L'océan PREMIÈRE VICTIME DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

par Marion Durand

Il est à fois acteur et victime. L'océan nous protège et limite l'ampleur du changement climatique en absorbant 90 % de l'excès de chaleur lié à l'augmentation de l'effet de serre et en captant un tiers du CO₂ présent dans l'atmosphère. Mais en contrepartie son état se dégrade : les eaux se réchauffent, s'acidifient et le niveau des mers ne fait qu'accroître.

Si l'expression « poumon vert » de la planète, utilisée en référence aux grandes forêts tropicales est connue de tous, plus rares sont ceux qui connaissent son homologue bleu : l'océan. Car oui, l'océan n'est pas qu'une gigantesque étendue d'eau, c'est aussi notre meilleur allié car il rend notre planète habitable. Tout comme les forêts, l'océan joue un rôle crucial dans la régulation du climat car il produit de l'oxygène et absorbe du dioxyde de carbone.

Sur les 40 milliards de tonnes de CO₂ produits chaque année par l'activité humaine, moins de 50 % restent dans l'atmosphère. Le reste est absorbé par la végétation terrestre et par l'océan. Sans ces deux puits de carbone, le réchauffement climatique aurait largement dépassé 1°C. Sans l'océan et ses propres capacités d'absorption, la planète serait bien plus chaude et la quantité de CO₂ dans l'atmosphère serait beaucoup plus importante que celle observée aujourd'hui.

En plus de retirer une partie du CO₂ d'origine anthropique présent dans l'atmosphère, l'océan ralentit le réchauffement d'une autre façon : il est capable de stocker 90 % de la chaleur excédentaire générée par le réchauffement

du climat. « Dans des conditions normales et non perturbées, la Terre renvoie la même quantité d'énergie qu'elle reçoit du soleil, ce qui donne un quasi-équilibre entre l'énergie entrant dans le système climatique terrestre par le rayonnement solaire et l'énergie sortante », décrit l'océanographe Karina von Schuckmann. « Mais aujourd'hui, avec le changement climatique et les émissions de gaz à effet de serre, moins d'énergie quitte la Terre. Ce surplus de chaleur s'accumule, réchauffe l'océan et l'atmosphère et fait fondre la glace », souligne-t-elle.

L'océan est le premier impacté par ce surplus de chaleur car il absorbe 90 % de l'énergie excédentaire contre 5 % dans les continents, 1 % dans l'atmosphère et 4 % ont provoqué la fonte de la cryosphère. L'origine de cet excès de chaleur est clairement attribuée aux activités humaines (lire encadré), les émissions anthropiques (gaz à effet de serre, aérosols et leurs précurseurs) ont entraîné un réchauffement planétaire sur plusieurs décennies, provoquant un déséquilibre dans le bilan énergétique de la Terre.

Des eaux plus chaudes, plus acides et sous-oxygénées

En captant un tiers du CO₂ d'origine anthropique et une grande partie du surplus de chaleur présent dans l'atmosphère, l'océan est capital pour stabiliser le climat de la Terre mais ce n'est pas sans conséquences. En contrepartie, son état se dégrade et les eaux se réchauffent.

Selon le GIEC, l'océan mondial s'est réchauffé de manière certaine jusqu'à 700 mètres de profondeur depuis les années 1970. Les vagues de chaleur océaniques se multiplient : une période d'au moins 5 jours où la température de l'eau est plus élevée que 90 % des enregistrements historiques pour un endroit et une période de l'année données. Selon le dernier rapport du GIEC, elles ont doublé en fréquence depuis 1982 et augmentent en intensité. Cette hausse des vagues de chaleur entraîne aussi des épisodes de blanchissement des coraux qui menacent la survie des récifs.

Mi-avril, l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA) alertait sur un nouvel épisode massif de blanchissement des coraux, le deuxième en 10 ans. « Alors que les océans continuent de se réchauffer, le blanchissement des coraux devient de plus en plus fréquent et grave », a dé-

Le changement climatique c'est quoi ?

Les changements climatiques désignent les variations à long terme de la température et des modèles météorologiques. Il peut s'agir de variations naturelles, dues par exemple à celles du cycle solaire ou à des éruptions volcaniques massives. Cependant, depuis les années 1800, les activités humaines constituent la cause principale des changements climatiques, essentiellement en raison de la combustion de combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz.

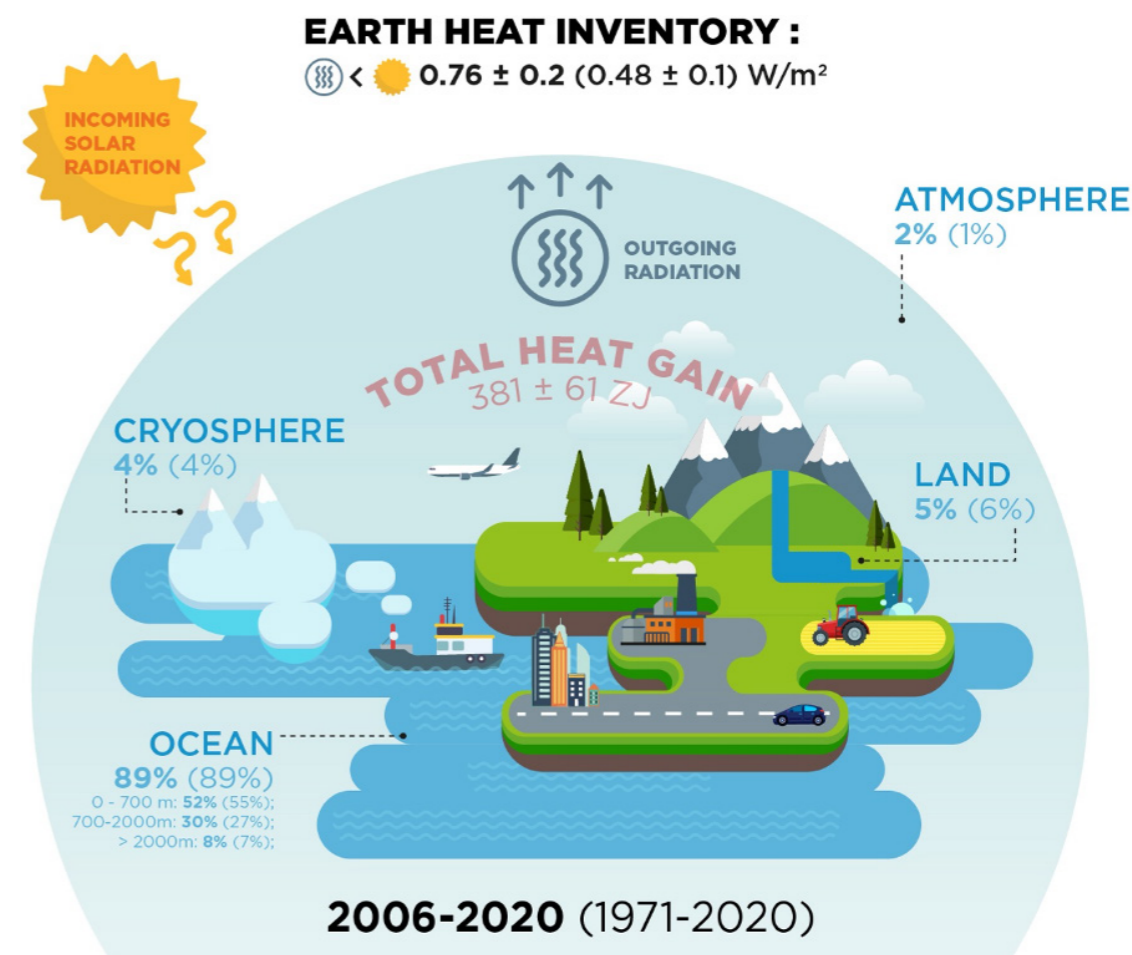
Concernant les océans le changement climatique se traduit très concrètement :

90 % de la chaleur accumulée sur Terre entre 1971 et 2010, principalement en raison de l'intensification de l'effet de serre, a été stockée dans l'océan.

30 % environ du dioxyde de carbone (CO₂) généré par les activités humaines a été absorbé par l'océan depuis le début de la révolution industrielle. Ce phénomène contribue à modérer le réchauffement global de la planète. Sans cette faculté, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère serait beaucoup plus importante que celle observée aujourd'hui.

4,5 mm - Selon l'Organisation météorologique mondiale, le niveau moyen de la mer a atteint un nouveau record en 2021, augmentant en moyenne de 4,5 millimètres par an sur la période 2013 à 2021. La hausse du niveau des mers entraînera des événements extrêmes, des submersions historiquement rares, de façon annuelle à l'horizon 2100. Des atolls seront inhabitables dès 2050 et le risque d'inondation sera 10 à 100 fois plus élevé d'ici 2100.

Une étude publiée dans le journal *Earth System Science Data* par une équipe internationale de 70 chercheurs provenant de 15 pays, dirigée par Karina von Schuckmann de Mercator Ocean International, révèle que 89% de l'excès de chaleur accumulé dans le système terrestre au cours des soixante dernières années a été absorbé par l'océan



-claré Derek Manzello, coordinateur de l'observatoire des récifs coralliens de la NOAA.

La hausse des températures de la surface aux profondeurs entraîne une montée du niveau des mers, principalement par dilatation (sous l'effet de la chaleur, l'eau gagne en volume) et par la fonte de glace des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Entre 1901 et 2018, le niveau marin mondial a augmenté de 20 cm. Cette élévation s'accroît ces dernières décennies. Selon l'Organisation météorologique mondiale, le niveau moyen de la mer a atteint un nouveau record en 2021, augmentant en moyenne de 4,5 millimètres par an sur la période 2013 à 2021. « Si le changement climatique se poursuit, l'élévation du niveau de la mer pourrait être de quelques dizaines de centimètres d'ici à la fin du siècle », décrit la climatologue Sabrina Speich.

L'absorption de gaz à effet de serre par l'océan accroît aussi son acidification.

Ce phénomène affecte de nombreux organismes (en particulier ceux utilisant le carbonate de calcium, tels les coquillages) et les écosystèmes marins. Il contraint les espèces à migrer vers des eaux moins chaudes. Ce qui provoquerait un déclin du nombre d'espèces dans les régions où la température de l'eau est plus élevée et leur augmentation significative dans les régions plus froides, situées autour des pôles.

De plus, l'augmentation des températures altère la structure physique de l'océan et a des répercussions sur la vie sous-marine. Une diminution des teneurs en oxygène de l'océan mondial est mesurée depuis 1960, en corrélation avec l'augmentation de sa température. Les poissons qui dépendent de cet oxygène se développeront plus lentement, diminueront en taille et se reproduiront moins.

Fin du rôle de régulateur ?

L'équilibre naturel de l'océan et de l'at-

mosphère est de plus en plus perturbé par les répercussions des activités humaines. À l'avenir, l'océan sera-t-il toujours capable de jouer son rôle de régulateur du climat ? Rien n'est moins sûr selon Karina von Schuckmann : « Les capacités de l'océan à stocker du carbone seront affaiblies par le changement climatique car l'augmentation de la température limite les échanges entre les eaux profondes vers la surface ».

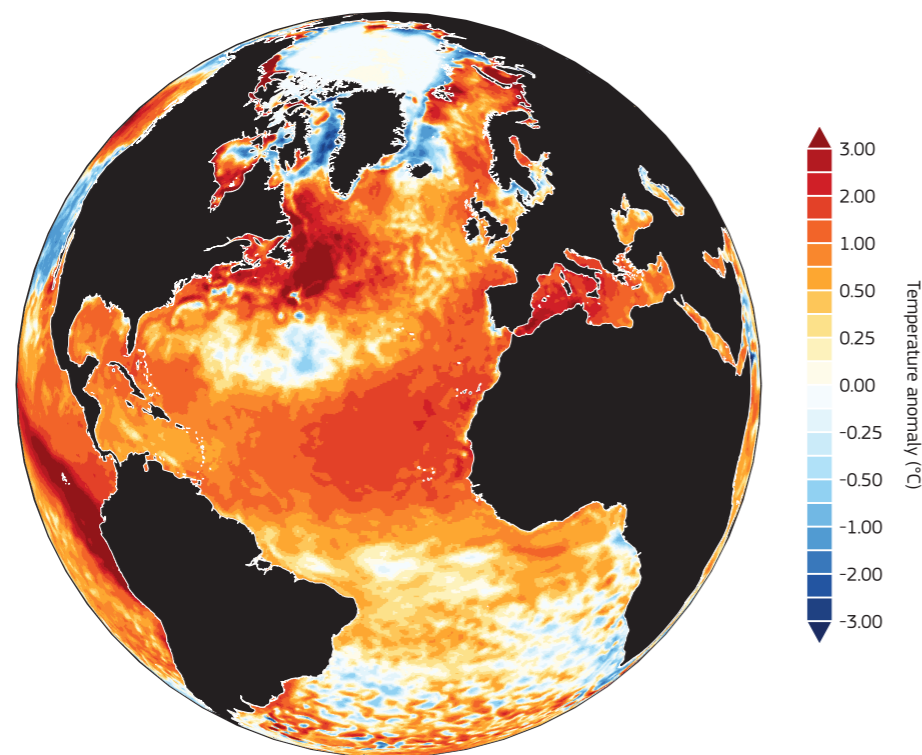
En effet, le réchauffement de l'eau de mer réduit également l'efficacité de l'absorption physique du CO₂ par l'océan, ce qui pourrait amoindrir son rôle d'amortisseur du réchauffement climatique.

Ainsi, toute diminution de la capacité des océans à capter le dioxyde de carbone est susceptible d'accroître sa concentration globale dans l'atmosphère et de contribuer dès lors davantage au changement climatique.

Anomalie de température de surface de la Terre du mois de juillet 2023, mesurée par le satellite ERA-5 comparativement à la période de référence 1991-2020, un record atteint en Juillet 2023 - Data source: ERA5. © Copernicus Climate Change Service/ECMWF.

SEA SURFACE TEMPERATURE ANOMALY • JULY 2023

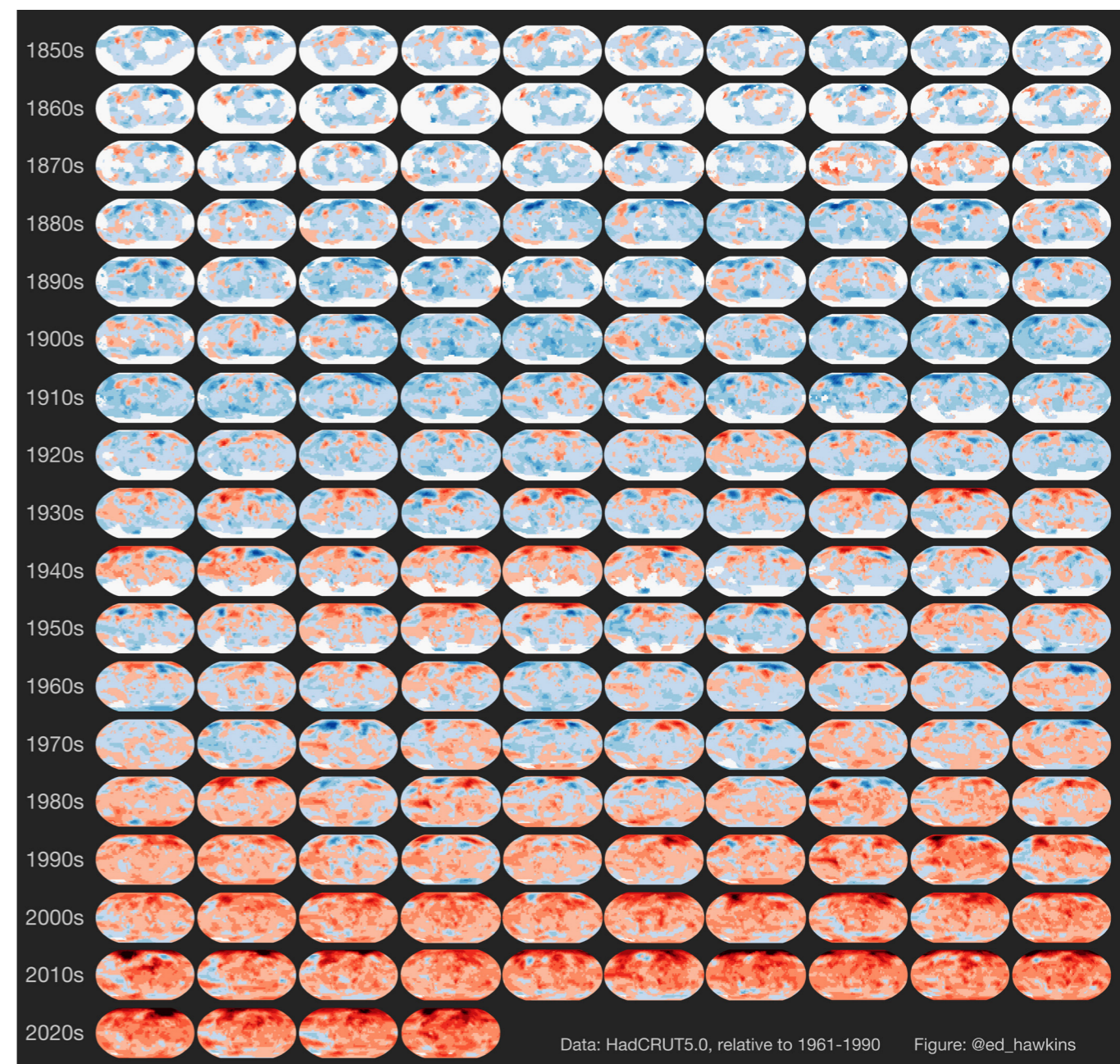
Reference period: 1991-2020 • Data: ERA5 • Credit C3S/ECMWF



La RESPONSABILITÉ DE L'HOMME EST SANS ÉQUIVOQUE

par Marion Durand

Cartographie des changements de température, chaque année de 1850 à 2023 © Ed Hawkins - Université de Reading, UK



Data: HadCRUT5.0, relative to 1961-1990 Figure: @ed_hawkins

Les scientifiques ont démontré que l'être humain et ses activités sont responsables du réchauffement climatique dans le monde, au cours des 200 dernières années. Les émissions de dioxyde de carbone qui résultent de l'utilisation de carburants pour alimenter les véhicules ou du charbon pour chauffer un bâtiment participent notamment au changement climatique.

« Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les continents ». Ce sont les mots des chercheurs du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (1).

Depuis plus de 30 ans, ce comité scientifique international évalue l'état des connaissances sur l'évolution du climat, ses causes, ses impacts. L'origine anthropique, c'est-à-dire liée aux activités humaines, du réchauffement climatique actuel ne fait désormais aucun doute. Pourquoi ? La cause principale établie sont les gaz à effet de serre. Ils sont émis par les activités humaines depuis l'ère industrielle et viennent s'ajouter aux gaz à effet de serre naturels (comme la vapeur d'eau).

Parmi ces gaz à effet de serre d'origine anthropique, on peut citer le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote ou les gaz fluorés. Tous réchauffent la planète différemment. Le dioxyde de carbone (CO₂) est majoritaire, il représente 75 % du total des

gaz à effet de serre émis par les activités humaines. Ce gaz est tracé depuis 1850.

Les émissions de CO₂ ont deux provenances. Elles peuvent venir d'une part du changement d'affectation des sols gérés par l'homme. Par exemple, la déforestation. Les forêts absorbant naturellement le CO₂ de l'atmosphère, elles prennent leur part dans le stockage naturel et régulent ainsi le climat. Cet effet positif est perdu lorsque les arbres sont abattus ; le carbone stocké est alors libéré dans l'atmosphère et accentue l'effet de serre.

Le transport routier, l'activité la plus émettrice de CO₂

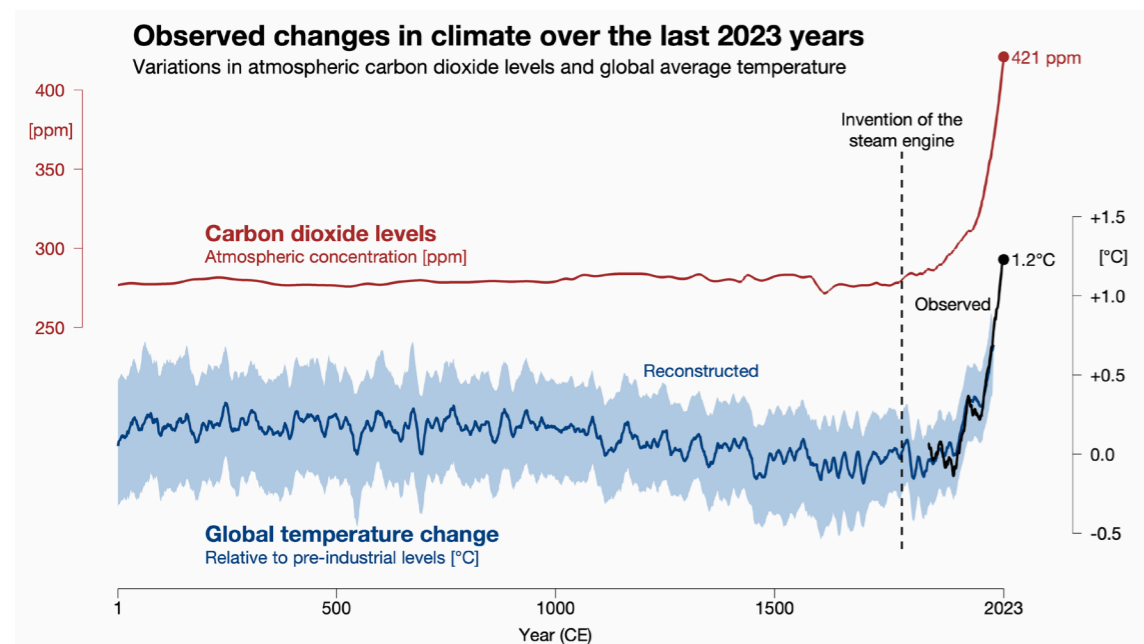
D'autre part, les émissions de CO₂ proviennent de procédés industriels et surtout de la combustion des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz fossile...). Depuis l'ère industrielle, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère

n'a fait qu'augmenter. La relation directe entre cette concentration et la hausse des températures est clairement établie par les scientifiques.

Selon l'Insee, en 2022, le secteur du transport routier est l'activité la plus émettrice de gaz à effet de serre en France, avec 122,4 millions de tonnes de CO₂ émis dans l'année. L'agriculture et la sylviculture arrivent en deuxième position (76 millions de tonnes) devant l'industrie manufacturière et la construction (73 millions de tonnes).

« Entre 1850 et 2019, les sociétés humaines ont ajouté 2 430 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère ! », assure une vidéo pédagogique produite par le journal Le Monde, en partenariat avec le youtubeur Le Réveilleur.

Les pays développés représentent plus de 45 % des émissions de CO₂. L'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie de l'Est (dans l'ordre) sont les pays les plus émetteurs dans le cumul des émissions passés depuis 1850.



Changements climatiques observés sur les 2323 dernières années : variations de la teneur atmosphérique en CO₂ et de la température globale
© Ed Hawkins - Université de Reading, UK

Le Réchauffement et La Fonte Des Glaciers menacent L'AMOC

par Marion Durand

Les données scientifiques sont aujourd'hui insuffisantes pour quantifier l'ampleur de l'affaiblissement de la circulation méridionale de retournement de l'Atlantique (AMOC). Les modèles prédisent tout de même une modification à venir. Plusieurs phénomènes liés au changement climatique pourraient participer à la déstabilisation de cette circulation océanique dans le futur : le réchauffement de l'océan, la fonte des glaciers et de la banquise et le dégel du pergélisol.

Les courants océaniques, très sensibles aux variations du climat seront affectés par le changement climatique. Selon le dernier rapport du GIEC, les observations, tant in situ (2004-2017) que basées sur des reconstructions de la température de surface de la mer, indiquent que la circulation méridionale de retournement de l'Atlantique (AMOC) s'est affaiblie par rapport à 1850-1900. Les données sont encore insuffisantes pour quantifier l'ampleur de l'affaiblissement ou pour l'attribuer

correctement au forçage anthropique. Or les simulations de modèles le présentent bel et bien. Ainsi déstabilisé, ce grand tapis roulant empêcherait la redistribution de chaleur autour du globe.

Connaît-on les causes ? Les gaz à effets de serre et le changement climatique sont-ils responsables d'un ralentissement de la circulation méridionale de renversement de l'océan Atlantique (AMOC) ?

Quatre phénomènes, indéniablement liés au changement climatique, participent dès à présent à perturber cette circulation océanique : le réchauffement des eaux de mer, la fonte des glaciers et de la banquise et le dégel du pergélisol. L'AMOC est en effet influencé par les gradients de densité de l'eau qui sont affectés à la fois par la température et la concentration en sel. Or, la température et la salinité sont deux variables modifiées par le changement climatique.

Un océan TROP CHAUD

Le bon fonctionnement de l'AMOC repose sur des différences de températures et de salinité de l'eau selon que l'on se situe vers l'équateur ou vers les pôles. Rappelons que ce courant transporte l'eau chaude et salée du sud vers le nord et permet ainsi de redistribuer la chaleur autour du globe. Or, l'océan se réchauffe à cause du réchauffement climatique dans toutes les régions du monde. Ce qui génère un processus de stratification car la différence de densité entre les eaux de surface et les couches plus profondes se renforce. L'eau en surface, plus chaude devient ainsi plus légère alors que les couches profondes deviennent plus froides et plus denses.

Arrivée au nord, l'eau lourde doit physiquement s'enfoncer dans les couches océaniques pour entamer le trajet retour vers le sud. Mais si sa densité n'est pas suffisante, parce que sa température a augmenté, alors cette circulation océanique est perturbée car son moteur est ralenti.

La FONTE DES CALOTTES GLACIAIRES

Le réchauffement climatique a entraîné un rétrécissement généralisé de la cryosphère, avec une perte de masse des calottes glaciaires et des glaciers et de façon accélérée durant les dernières décennies. On estime que 1 % de l'excès de chaleur global (extrait de l'atmosphère) accentue la fonte des glaciers et des calottes.

La fonte des glaces a ainsi un impact sur la circulation océanique car elle génère un apport d'eaux douces aux hautes latitudes, rendant l'océan de surface moins dense et moins salé. Cet apport d'eau douce pourrait limiter les phénomènes de convection, ralentissant ainsi la circulation globale en empêchant la formation d'eaux profondes.

La FONTE DE La BANQUISE

La banquise, c'est-à-dire la glace de mer, diminue aussi avec le changement climatique. Elle est passée d'environ 3,50 m en 1980 pour la période hivernale à moins de 2,50 m en 2019. Si elle ne contribue pas à la hausse du niveau marin puisqu'elle baigne déjà dans l'océan, elle augmente elle aussi l'apport en eau douce, ce qui rend l'océan moins dense.

La banquise est une surface à fort albédo, c'est-à-dire qu'elle réfléchit une grande partie du rayonnement solaire, contribuant ainsi à maintenir des températures plus basses. Lorsque sa surface diminue au profit de l'océan, son albédo est plus faible et absorbe alors davantage de chaleur solaire ; ce qui contribue à des températures plus élevées. Ainsi, la fonte de la banquise peut avoir des répercussions significatives sur la circulation océanique mais aussi sur le climat global.

Le DÉGEL DU PERGÉLISOL

Le dégel du pergélisol (permafrost en anglais), ces sols perpétuellement gelés dans les régions Arctiques, participe aussi à affaiblir l'AMOC car lorsqu'il fond, le pergélisol libère du dioxyde de carbone et du méthane, des émissions qui contribuent à l'augmentation des températures. On estime que le pergélisol contiendrait 1460 à 1600 giga tonnes de carbone organique, soit près du double du carbone de l'atmosphère !

Et ce dégel est préoccupant car il s'accroît : selon le GIEC, le pergélisol de surface devrait perdre entre 8 et 40 % de sa superficie dans le scénario le plus optimiste (entre 49 et 89 % de sa superficie dans les projections les plus pessimistes).

Iceberg en océan Austral © Sabrina Speich



Interview Julie Deshayes, océanographe - propos recueillis par Marion Durand

”Le CHANGEMENT CLIMATIQUE POURRAIT DÉRÉGLER La CIRCULATION OCÉANIQUE”

Alors que la circulation thermohaline atlantique est très stable depuis environ un millénaire, plusieurs études suggèrent qu'un ralentissement s'est amorcé ces dernières années. Cette circulation, essentielle à la redistribution de chaleur autour du globe, est-elle en train de se dérégler ? Pourrait-elle s'arrêter ? Ces questions, teintées d'inquiétude, agitent la communauté scientifique et la sphère publique mais les réponses restent vagues car l'observation de cet ensemble de courants est trop récente pour affirmer qu'un ralentissement est en cours. Ce qui est sûr, selon l'océanographe Julie Deshayes, c'est que le changement climatique bouleversera cette circulation océanique dans le futur.

Julie Deshayes est directrice de recherche CNRS et climatologue au LOCEAN (Laboratoire d'océanographie et du climat expérimentations et approches numériques), une unité mixte de recherche dépendant de quatre tutelles : Sorbonne Université, le Centre national de la recherche scientifique

(CNRS), l'Institut de recherche pour le développement (IRD) et le Muséum national d'histoire naturelle.

Spécialiste des courants marins et de la circulation océanique, la physicienne tente de mieux comprendre le rôle de l'océan dans le changement climatique. En 2006, Julie

Deshayes a soutenu une thèse consacrée à l'influence de la formation d'eau profonde sur la variabilité de la circulation méridienne moyenne dans l'Océan Atlantique. Elle consacre aujourd'hui une grande partie de son temps à sensibiliser le grand public à l'urgence climatique.

Pourquoi les courants océaniques sont-ils importants pour le climat mondial ?

Les courants océaniques font partie du climat terrestre, ils sont même au départ des changements climatiques. Les courants marins sont importants pour le climat parce qu'ils redistribuent l'excédent de chaleur perçu à l'équateur vers les pôles. En fait, dans les zones équatoriales, la Terre perçoit plus de chaleur de la part du soleil qu'elle n'en émet, tandis qu'aux pôles elle émet plus de chaleur qu'elle n'en reçoit. Si rien ne se passait dans l'océan, le corps terrestre se réchaufferait sans cesse à l'équateur et se refroidirait aux pôles. Or ce n'est pas le cas, et cet équilibre est possible grâce aux courants marins. Au cœur de cette grande circulation océanique, il y a l'AMOC, la circulation méridienne de retournement atlantique.

Plusieurs études suggèrent qu'un ralentissement s'est amorcé ces dernières années. Est-ce le cas ?

Le souci avec les courants marins, c'est qu'ils sont extrêmement difficiles à observer. C'est un énorme challenge pour les océanographes ! On peut voir ceux qui sont en surface grâce aux images satellites, mais ceux qui sont au fond — car il y a des courants jusqu'à 5 000 mètres de profondeur — sont cachés. Les satellites ne les distinguent pas et nous n'avons pas d'autre solution que d'aller sur place pour les mesurer. C'est extrêmement difficile de les mesurer de façon continue dans l'espace et dans le temps.

”TOUT LE PROBLÈME RÉSIDE DANS LA DIFFICULTÉ D'OBSERVER CES COURANTS.”

Cette difficulté d'observation est donc un frein pour en savoir davantage sur l'état de l'AMOC ?

Tout à fait, nous avons très peu de données disponibles et ce manque d'information est un verrou pour bien comprendre le rôle des courants marins dans le climat et leurs évolutions. Je rappelle que l'AMOC, auparavant nommé circulation thermohaline, n'est pas un courant mais la synthèse de

tous les courants qui contribuent à ramener de la chaleur de l'équateur vers le Nord. C'est un outil qui a permis aux climatologues de synthétiser une multitude de courants différents pour comprendre le rôle de l'océan dans le climat, et notamment dans le transfert d'énergie vers les pôles. Ce n'est que depuis 2004 qu'on mesure réellement l'intensité de cette circulation et on se rend compte qu'elle varie énormément d'une semaine à l'autre, d'un mois à l'autre, d'une saison à l'autre, d'une année sur l'autre, beaucoup plus que ce qu'on imaginait.

Pourquoi ?

Parce que nous ne l'avons jamais observé auparavant. Nous avons seulement 20 ans de mesures, nous n'avons pas la capacité de dire si cette circulation diminue ou pas. Tout ce que nous voyons c'est qu'elle varie énormément sur des échelles de temps très courtes. Nous utilisons d'autres mesures indirectes pour comprendre l'intensité que pouvait avoir cette circulation thermohaline dans le passé en se servant des modèles et de la théorie.

Les scientifiques ne sont pas tous d'accord sur l'ampleur ou la poursuite de ce ralentissement sur le long terme, pourquoi ?

À ce sujet, il y a des désaccords dans la communauté scientifique mais nous avons un certain nombre de preuves qui indiquent que cette circulation va diminuer dans le futur à cause du changement climatique et des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Sur ce point, tous les modèles sont à peu près d'accord. Les désaccords entre les modèles concernent la vitesse à laquelle ça va diminuer et à partir de quand.

Aujourd'hui, on ne peut pas affirmer qu'il y a un ralentissement ?

Non, ce ne sont que des hypothèses qu'on essaye de confirmer ou d'infirmer au travers des méthodologies qui sont à notre disposition. Tout le problème réside dans la difficulté d'observer ces courants. Il y a des éléments qui nous renseignent sur l'intensité de la circulation depuis le dernier millénaire, ils indiquent qu'elle est déjà en train de diminuer depuis très longtemps. Cette diminution était-elle déjà amorcée avant même qu'il y ait des émissions de gaz à effet de serre provenant des activités anthropiques ? Ce n'est pas encore clair car les mesures actuelles sont incapables de donner cette information puisqu'elles ne remontent pas suffisamment dans le passé.

Si on ne peut pas affirmer qu'il y a un ralentissement, est-on certain que la circulation océanique serait perturbée dans le futur ?

”CETTE CIRCULATION EST UN DES RÉGULATEURS DU CLIMAT, UN THERMOSTAT. SI L'AMOC VENAIT À SE DÉRÉGLER, IL Y AURAIT DES CONSÉQUENCES PROFONDES SUR TOUT LE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE CLIMATIQUE TERRESTRE.”

Pour savoir ce qu'il va se passer dans le futur, on utilise des modèles pas des observations. Et sur ce point, tous les modèles sont d'accord pour dire que l'AMOC va diminuer fortement. Mais quand ? Est-ce que ce sera demain ? En 2025 ? En 2050 ? En 2100 ? C'est là où les modèles divergent.

Quel est l'impact du changement climatique sur cette circulation ?

Le changement climatique et les émissions de gaz à effet de serre pourraient induire une diminution de cette circulation thermohaline en raison de l'augmentation des températures. On sait que les émissions de gaz à effet de serre sont à l'origine d'un réchauffement de la température à l'échelle globale. Dans l'océan, l'eau de surface se réchauffe et devient plus légère qu'en profondeur. Mais si les eaux de surface deviennent plus légères dans les hautes latitudes, on coupe un des moteurs de la circulation qu'est la convection profonde. Ce qui pourrait expliquer qu'elle diminue fortement et qu'elle s'arrête. Aussi, la fonte de la glace de mer entraîne un apport d'eau douce plus important. Cette eau douce est plus légère que l'eau salée, ce qui perturbe encore une fois la convection.

Le changement climatique peut-il dérégler totalement la circulation océanique ?

Oui, tout à fait, le changement climatique en cours pourrait dérégler la circulation océanique. C'est difficile de se rendre compte de l'ampleur de ces bouleversements et des modifications futures pour les océans. Cette circulation est un des régulateurs du climat, un thermostat. Si l'AMOC venait à se



dérégler, il y aurait des conséquences profondes sur tout le fonctionnement de la machine climatique terrestre. Si elle s'arrête, c'est tout le transport de chaleur à grande échelle qui sera perturbé mais elle affectera aussi la circulation du sel, de l'eau douce ou du carbone. Il est certain qu'une diminution de cette circulation, serait une catastrophe.

Le rapport du GIEC de 2019 considère qu'un arrêt au cours de ce siècle est improbable. Pourquoi ?

Les études publiées l'année dernière montrent qu'il est fort probable que l'arrêt ait lieu plus tôt que prévu. Si on avait des observations remontant à 150 ou 250 ans, on utiliserait des outils d'intelligence artificielle ou simplement des méthodes statistiques pour prédire ce qu'il se passera à l'avenir. Mais le manque d'observations directes nous oblige à passer par des modèles qui mettent en évidence des biais car ils contiennent des erreurs. Il est vrai qu'on peut se poser la question de la validité de cette prédiction des modèles mais on ne s'appuie pas sur un seul modèle qui prédit une modification de l'AMOC. Il en existe une cinquantaine aux comportements très différents qui indique qu'il est très probable que cette circulation océanique ralentisse très fortement dans les prochaines années.

Un ralentissement de l'AMOC représente-t-il un point de bascule ?

Quand on parle de diminution rapide, importante et brutale de l'AMOC, c'est parce qu'on a franchi un point de bascule. Une fois dépassé, si on avait une baguette magique pour retirer tous les gaz à effet de serre dans l'atmosphère il faudrait tout de même beaucoup de temps pour revenir au climat actuel.

Est-ce qu'on sait aujourd'hui ce qu'il faudrait faire pour éviter d'atteindre ce point de bascule ?

Oui. Il faut arrêter d'émettre des gaz à effet de serre. Sur ça, il n'y a pas d'hésitation. C'est encore plus important du fait de la complexité de cette circulation thermohaline et parce qu'on ne sait pas à quelle distance on se trouve de ce point de bascule. Il ne faut pas prendre de risque ! La probabilité que ce ne soit pas aussi grave que ce qu'on prévoit est nulle. La preuve, dans le dernier rapport du GIEC, on a mis à l'épreuve des modèles plus réalistes et ils prédisent tous une diminution avec une intensité plus importante que ce qu'on avait envisagé.

Qu'est-ce qu'un modèle plus réaliste ?

C'est une catégorie de modèles ayant une résolution spatiale plus fine, c'est-à-dire capable de représenter le détail des côtes ou la bathymétrie des océans. Ces modèles sont beaucoup plus coûteux en temps de calcul et on n'arrive moins à quantifier les incertitudes qui leur

sont associées. C'est pourquoi leur utilisation reste modérée par rapport à des modèles de plus basse résolution bien moins chers.

Peut-on limiter ou contenir ce ralentissement annoncé ?

Oui, clairement. L'AMOC est une synthèse de tous ces courants océaniques qui sont le reflet de toutes les masses d'eau à la surface de la planète. Si on réussissait immédiatement à arrêter les émissions de gaz à effet de serre, cela permettrait grandement de limiter ce ralentissement. Mais on sait aussi que l'océan a une mémoire, ce n'est pas parce qu'on arrête tout qu'on va stopper tous les bouleversements en cours.

L'océan arrive-t-il au bout de ses capacités de régulateur du climat ?

Si l'AMOC s'arrête et qu'on dépasse ce point de bascule, oui. On aura alors un océan séparé en deux parties : une surface très chaude qui réagira quasiment instantanément par rapport à ce qui se passe dans l'atmosphère ; et un océan profond complètement isolé du reste, qui ne sera plus en mouvement. Le rôle de l'océan comme régulateur sera complètement annihilé. Ce serait un changement de régime climatique avec un océan qui n'est plus du tout acteur du climat terrestre parce qu'il n'en a plus la capacité. Ce scénario est très inquiétant et les conséquences pour le climat seraient désastreuses.



CIRCULATION OCÉANIQUE : ET SI CE GRAND TAPIS ROULANT S'ARRÊTAIT ?

Par Marion Durand

Tous les scénarios climatiques prévoient un affaiblissement de l'AMOC durant le XXI^e siècle même si un changement brusque est peu probable avant cent ans. S'il survenait, les conséquences pourraient être multiples : élévation du niveau de la mer dans l'Atlantique Nord, augmentation des épisodes d'extrême froid en hiver en Europe du Nord, mais aussi hausse des canicules en été.

Que se passerait-il si l'AMOC venait à s'interrompre ? En février 2024, une nouvelle étude publiée dans la revue *Science Advances* simule les conséquences pour le climat d'un arrêt soudain de ce grand tapis roulant océanique.

La circulation méridionale de retour de l'Atlantique est « particulièrement sensible au forçage de l'eau douce de l'océan, soit par le flux d'eau douce de surface (par exemple, les précipitations), soit par l'apport d'eau douce dû au ruissellement des rivières ou à la fonte des glaces (par exemple de la calotte glaciaire du Groenland) », rappelle l'article en introduction.

Ces projections ont été réalisées sur la base d'un climat préindustriel, avant l'augmentation des gaz à effet de serre, en prenant en compte la fonte des glaces sur la circulation des courants de l'océan Atlantique. Les résultats de l'étude, basée sur des simulations numériques complexes, montrent un refroidissement des températures de surface de la mer dans l'hémisphère Nord lorsque l'AMOC s'effondre, avec des différences pouvant atteindre 10 °C près de l'Europe occidentale. Au contraire, les températures de l'eau de surface dans l'hémisphère sud aug-

mentent en raison de l'effondrement, ce qui entraîne une bascule distincte entre les hémisphères.

« L'affaiblissement de l'AMOC se traduit, via l'équilibre géostrophique, par une élévation dynamique du niveau de la mer dans l'océan Atlantique et certaines régions côtières connaissent une élévation dynamique du niveau de la mer de plus de 70 cm », poursuivent les auteurs de l'étude.

Augmentation des événements extrêmes

Les changements de température de l'eau de surface dus à l'effondrement de l'AMOC affectent également l'atmosphère et la répartition mondiale des glaces de mer. Toutes ces modifications perturbent les climats régionaux à travers le monde. L'arrêt de l'AMOC entraînerait d'abord un refroidissement du climat de l'Europe du Nord. L'océanographe et climatologue Julie Deshayes ajoute qu'une augmentation des épisodes d'extrême froid en hiver en Europe du Nord seraient probables ainsi que des canicules en été. L'étude prévoit des changements significatifs dans certaines régions : la forêt amazonienne présente un changement radical dans ces schémas de précipita-

tions, la saison sèche devient la saison des pluies. Ces changements pourraient « gravement perturber l'écosystème de la forêt amazonienne et potentiellement conduire à un basculement en cascade », s'inquiètent les auteurs.

« De façon générale, on s'attend à une augmentation des tempêtes et des événements extrêmes toutes saisons confondues pour toute la façade de l'Europe de l'Ouest. Dans les régions équatoriales, un dérèglement de la circulation océanique entraînerait une intensification des précipitations au niveau de l'Équateur sur l'Afrique, là où il y en a déjà beaucoup et une intensification des sécheresses dans la partie désertique de l'Afrique de l'Ouest », complète Julie Deshayes.

Moins de stockage de carbone

Dans le contexte de l'intensification de l'effet de serre, la circulation océanique joue un rôle fondamental : elle permet d'injecter de la chaleur de la surface de l'océan vers les profondeurs. Si cette circulation est interrompue, l'eau de surface se réchauffera bien plus vite. Aussi, ce mélange des masses d'eau permet de stocker, dans les profondeurs de l'océan, une partie du dioxyde de carbone émis par les activités hu-

maines. Un ralentissement ou un arrêt de la circulation globale pourrait avoir des conséquences considérables pour nos sociétés. Il impliquerait une diminution de l'assimilation de carbone et de chaleur par l'océan, et donc une augmentation de ces valeurs dans l'atmosphère. Cela pourrait accélérer le rythme du réchauffement actuel.

L'AMOC influence également les écosystèmes marins à grande échelle avec le transport vertical de nutriments et de gaz, notamment de l'oxygène. Un arrêt de la circulation océanique perturberait de nombreux écosystèmes qui dépendent de cet apport en nutriments pour survivre.

« Une modification de l'AMOC entraînerait une redistribution à la fois de la chaleur, de l'eau douce et des nutriments, les écosystèmes vont devoir suivre et s'adapter », rappelle Serge Planton. « Les espèces qui n'ont pas de capacité d'adaptation et de déplacement vont subir directement les modifications de l'environnement. Mais pour ceux qui ont une capacité d'adaptation et la possibilité de se déplacer, alors dans un premier temps, ils pourront suivre.

Depuis ces 20 dernières années, certaines espèces de poissons se déplacent déjà mais le problème c'est que pour se nourrir, ils dépendent souvent d'organismes vivants qui eux, n'ont pas forcément la capacité de se déplacer. »

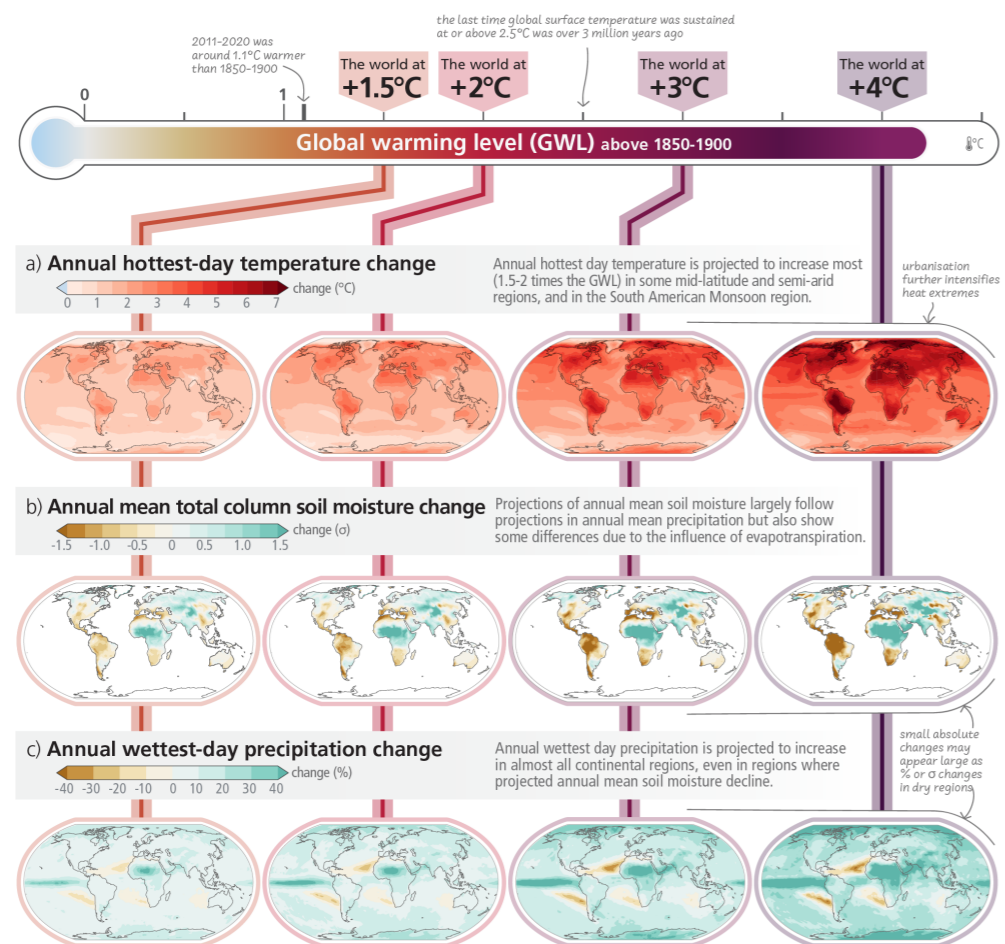
Un brutal changement de la circulation méridienne de retournement aura nécessairement un impact sur la biodiversité, qui n'aura pas le temps de s'adapter aux nouvelles températures, à la montée des eaux ou aux événements extrêmes. « Aucune mesure d'adaptation réaliste ne peut faire face à des changements de température aussi rapides en cas d'effondrement de l'AMOC », indiquent les auteurs de l'étude.

Si une diminution de l'AMOC est aujourd'hui très probable, il reste difficile de quantifier l'amplitude de cette baisse et de savoir sur quelle échelle de temps se situe le point de bascule.

Changements projetés de la température maximale journalière annuelle, de l'humidité totale moyenne annuelle de la colonne du sol et des précipitations maximales annuelles sur un jour à des niveaux de réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C et 4°C par rapport à la période 1850-1900.

© Figure 2, Rapport de Synthèse AR6 « Climate Change », GIEC IPCC 2023

With every increment of global warming, regional changes in mean climate and extremes become more widespread and pronounced



CHAPITRE 5

page 64

UN SYSTÈME GLOBAL D'OBSERVATION DE L'OCÉAN

par Carole Saout-Grit

page 68

LES SOLUTIONS FONDÉES DE LA NATURE POUR PRÉSERVER L'ÉQUILIBRE OCÉAN-CLIMAT

par Laurie Henry

page 71

LES CAMPAGNES D'OPPORTUNITÉ, UN COMPLÉMENT À LA RECHERCHE OCÉANIQUE

par Marion Durand

LES SOLUTIONS D'AVENIR

L'OBSERVATION DE L'océan EST ENFIN GLOBALE

Par Carole Saout-Grit

L'océanographie a connu une transformation radicale au cours des dernières décennies, devenue de plus en plus précise et opérationnelle grâce aux déploiements coordonnés de réseaux d'observation à l'échelle internationale. Aujourd'hui, nous sommes capables d'avoir une vision en trois dimensions des océans et de prendre leur pouls 24 heures sur 24. La révolution technologique et numérique de ce XXIème siècle a renforcé nos connaissances, nous permettant d'entrevoir des solutions pour faire face aux défis climatiques et environnementaux.

L'océanographie a longtemps progressé à petits pas sur la connaissance scientifique d'un milieu trop vaste à étudier, avec certaines régions parfois inexplorées comme les mers du Sud, trop éloignées ou inaccessibles du fait de leurs conditions météorologiques. La communauté scientifique internationale a organisé ses premiers efforts sous l'impulsion de la Commission Océanique Inter-gouvernementale (COI), créée en 1960 par l'UNESCO. En 1990, émerge le grand programme international WOCE qui coordonne de longues campagnes océanographiques. Pendant plus de dix années, les scientifiques sillonnent alors tous les océans du monde, en se répartissant les mesures le long de sections hydrographiques répétées et ce dans les trois grands bassins océaniques Atlantique, Pacifique et Indien.

L'innovation technologique au service de l'instrumentation et de la donnée

La bathysonde est utilisée depuis longtemps par les océanographes et demeure l'instrument de référence. Elle permet d'effectuer des mesures CTD

de pression, température et salinité entre la surface et 6000 mètres de profondeur. Ces données CTD servent d'ailleurs d'étalon pour le contrôle qualité des nouvelles données collectées par des instruments plus récents. Mais leur mise en œuvre a un coût : il faut mobiliser un navire océanographique équipé pour mener une campagne en mer et collecter la donnée suivant un protocole scientifique rigoureux. Depuis les années 70-80, des instruments de plus en plus sophistiqués ont été conçus pour élargir le spectre des mesures en mer : mesures atmosphériques en surface, mesures océaniques en surface et en profondeur, mesures en point fixe, mesures dérivantes... L'ensemble de ces dispositifs a progressivement permis la collecte de données complémentaires permettant de décrypter les mécanismes complexes dans l'océan.

Dans ce contexte, le développement de la flotte des navires océanographiques a également joué un rôle essentiel dans le soutien des missions de recherche en mer et l'acquisition de données océanographiques. En France, les navires de recherches de la Flotte Océanographique Française (FOF)

opérée par GENAVIR pour l'Ifremer, sont régulièrement mobilisés pour des campagnes océanographiques à caractère uniquement scientifique. Grâce à leur infrastructure avancée, ils permettent des manœuvres avec du matériel spécifique dans des environnements variés, des zones côtières jusqu'au grand large et de la surface jusqu'aux abysses.

La révolution Argo pour une vision complète de l'océan en trois dimensions

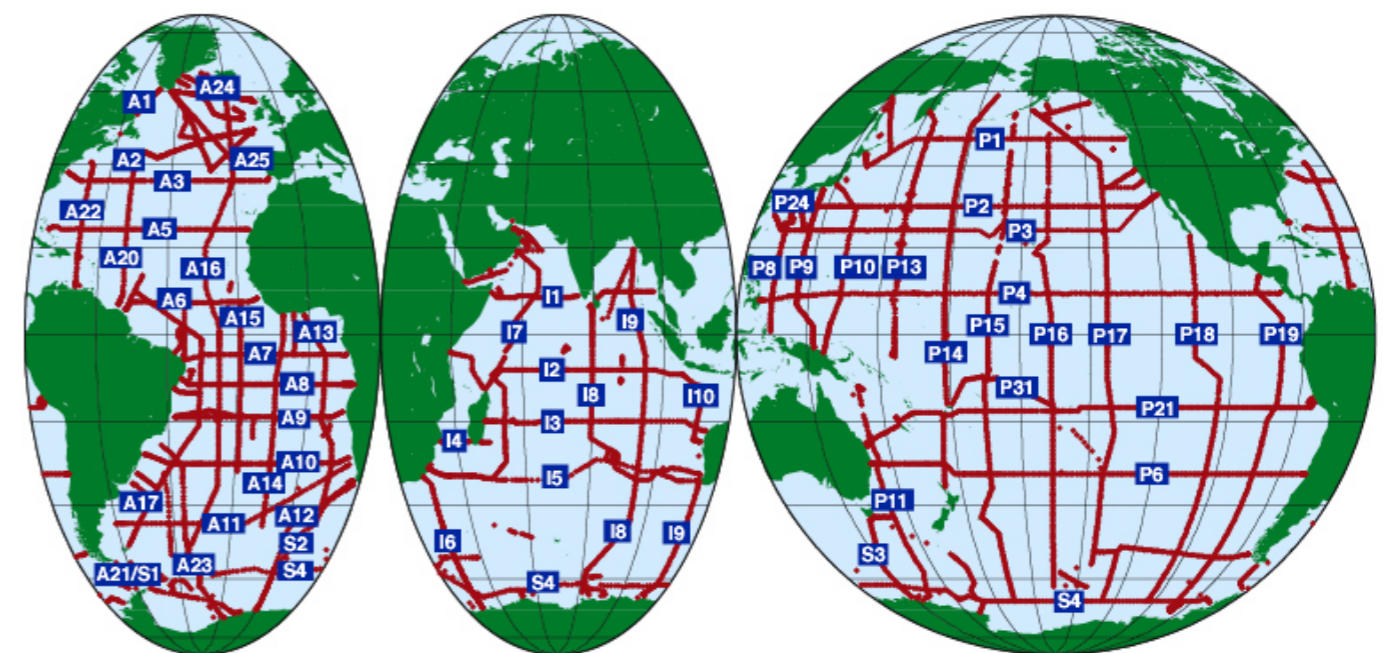
C'est au début des années 2000 que des instruments de type flotteurs sous-marins sont déployés en mer. Rendus autonomes grâce à la combinaison de nombreuses technologies innovantes (batterie, système hydraulique, programmation informatique, capteurs de mesure et antenne de télécommunication par satellite), le déploiement massif de ces flotteurs répond au besoin scientifique d'avoir un réseau global d'observation permanente de mesures de la température et de la salinité dans les 2000 premiers mètres de l'océan.



Bouée PIRATA sur le pont.

Les capteurs atmosphériques de surface installés sur la bouée mesurent les éléments suivants : vitesse et direction du vent, précipitation, radiation solaire, humidité et température de l'air. Ils constituent une station météorologique fixée sur les bouées du réseau PIRATA. Campagne PIRATA-FR21. - PIRATA est un réseau international maintenu pour l'étude des interactions océan-atmosphère dans l'Atlantique tropical et de leur rôle dans la variabilité climatique régionale. © IRD - Bernard Bourlès

Sections hydrographiques et stations de mesures effectuées pendant le programme WOCE. Source : Atlas WOCE de l'océan Austral. ©WOCE



Grâce à une coopération sans précédent de plus de 30 pays et le déploiement de 3000 flotteurs opérés depuis l'an 2000, le programme international Argo (qui a rapidement donné son nom aux flotteurs) révolutionne totalement l'observation des océans. En seulement quelques années, l'installation de ce nouveau réseau permet la collecte de plus d'un million de profils de température et de salinité entre la surface et 2000 mètres de profondeur, alors que les océanographes n'étaient jusqu'ici parvenus qu'à collecter 500 000 profils en un siècle !

Vingt ans plus tard, le réseau d'observation Argo offre enfin aux scientifiques une vision tridimensionnelle et en temps réel de l'océan. Grâce à leur accès libre (décidée comme telle par les scientifiques dès le démarrage du programme), ces données Argo sont devenues des sources d'information précieuses et incontournables pour la recherche océanographique. Aujourd'hui, près de 4000 flotteurs continuent de prendre le pouls des océans du monde. Y compris dans les mers du Sud que certains flotteurs Argo parviennent à parcourir en toute autonomie.

Les satellites révèlent la surface des océans

En parallèle, le développement des satellites a également révolutionné l'océanographie, grâce à des images et des mesures de l'océan très précises acquises depuis le ciel.

En 1978, SEASAT est le premier satellite déployé spécifiquement pour l'étude des océans par la NASA. Pour la première fois, il est équipé d'une communication de type ARGOS pour transmettre à terre les données mesurées au fur et à mesure de sa mission.

En 1992, le satellite TOPEX-Poséidon est mis au point grâce à des avancées technologiques. L'objectif est de mesurer avec une précision de quelques centimètres, la « topographie océanique » ou relief de la surface de l'océan. La série des satellites JASON (Jason-1 en 2001, Jason-2 (2008), et Jason-3 en 2016) qui suit permet d'étudier la circulation océanique et les interactions entre les océans et l'atmosphère. L'objectif de ces missions est d'améliorer les prévisions d'évolution du climat et de surveiller des phénomènes océaniques comme El Niño ou les zones de tourbillons océaniques. Les satellites TOPEX-Poséidon et JASON ont été développés conjointement par le CNES

français et la NASA américaine et ont marqué un véritable tournant dans l'histoire de l'océanographie pour affiner les connaissances scientifiques sur l'océan.

Les progrès technologiques et numériques du 21^{ème} siècle permettent de faire continuellement évoluer ces technologies. Ainsi en 2022, le satellite franco-américain Surface Water and Ocean Topography (SWOT) lancé par le CNES et la NASA a été spécialement conçu pour mesurer la hauteur des eaux océaniques et des eaux de surface avec une précision inégalée (océans, lacs, rivières). Il fournit actuellement une vue globale des changements dans les masses d'eau, améliorant notre compréhension des processus hydrologiques et océaniques, cruciale pour la gestion des ressources en eau et la prévision des inondations.

En 2024, le satellite américain PACE (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) lancé par la NASA, vient compléter ce réseau de surveillance des océans, de l'atmosphère et de leurs interactions. Il évalue la composition et la biomasse du phytoplancton, en fournissant également des données sur les aérosols atmosphériques et les nuages, ou encore sur la couleur des océans, un indicateur crucial pour la

surveillance des variations dans les populations de phytoplancton.

De meilleures prévisions océaniques grâce au numérique

Ces données in-situ collectées sur toute la colonne d'eau ont été progressivement intégrées dans des modèles numériques, pour visualiser et analyser l'océan en 3D et décrypter son fonctionnement.

Les modèles numériques ont également bénéficié des progrès technologiques et numériques. Ils ont aujourd'hui des capacités exceptionnelles, tant en termes de précision (l'océan est aujourd'hui modélisé au 1/12^{ème} de degré !) que de puissance

de calcul ou de capacité de stockage. Alimentés par une collecte de données in-situ et satellitaires croissante, ils offrent progressivement aux océanographes l'opportunité d'avancer à pas de géant dans la représentation numérique de l'océan.

L'objectif scientifique de modéliser l'océan est d'affiner les prévisions de son état de santé et de nous éclairer sur l'évolution du système climatique. La combinaison modèle-données permet de réduire les barres d'erreur des estimations. De nombreux acteurs et équipes scientifiques y contribuent, parmi lesquels COPERNICUS imaginé à l'initiative de l'Union ou MERCATOR OCEAN INTERNATIONAL chargé de la modélisation océanique au sein de COPERNICUS.

L'ensemble des efforts coordonnés de cette communauté scientifique internationale d'océanographes permet d'aboutir aujourd'hui, au terme de quelques décennies, à une océanographie opérationnelle pour surveiller l'océan en toutes saisons et en tous points du globe. Ce GOOS (Global Ocean Observing System) est placé au cœur de la nouvelle Décennie des Sciences Océaniques portée par l'UNESCO pour la période 2021-2030. Il doit permettre de mettre la science au service des enjeux de société et éclairer le chemin à suivre vers l'adaptation et la résilience nécessaires face au changement climatique.

Le Système Global d'Observation de l'Océan (GOOS) - © IOC-GOOS



Le satellite franco-américain Surface Water and Ocean Topography (SWOT) lancé par le CNES et la Nasa - © CNES/Mira Production, 2022





LES SOLUTIONS FONDÉES SUR La NATURE POUR PRÉSERVER L'ÉQUILIBRE Océan-CLIMAT

Par Laurie Henry

Face aux menaces d'un changement climatique accéléré, préserver l'équilibre océan-climat devient une urgence et une priorité. Les océans, régulateurs thermiques de la planète Terre, sont au premier plan de la lutte contre le réchauffement global, absorbant une part significative du CO₂ atmosphérique et de la chaleur excédentaire. Cependant, cette capacité de régulation est menacée par la pollution, la surpêche et l'acidification des eaux. Afin de contrer ces effets délétères, des solutions fondées sur la nature émergent, visant à mieux comprendre les écosystèmes marins et côtiers pour renforcer leur résilience climatique.

Mangroves et marais salants, des puits de carbone naturels

Les mangroves et les marais salants

sont parmi les écosystèmes les plus productifs et les plus efficaces en termes de séquestration du carbone. Selon une étude récente ⁽¹⁾, ces écosystèmes côtiers peuvent emmagasiner

jusqu'à quatre fois plus de carbone par unité de surface que les forêts tropicales.

En particulier, les mangroves stockent le carbone non seulement dans leur

biomasse aérienne et souterraine mais aussi dans les riches sédiments organiques qui se forment dans leurs racines entrelacées.

Les recherches montrent que les mangroves peuvent séquestrer jusqu'à 1,02 kilogramme de carbone par mètre carré par an. Les marais salants ne sont pas loin derrière, avec une capacité de séquestration qui peut atteindre 0,7 kilogramme de carbone par mètre carré par an. Ces chiffres mettent en évidence l'importance vitale de ces écosystèmes. Ils contribuent à atténuer les effets des changements climatiques, tout en protégeant les côtes contre l'érosion et en fournissant des habitats pour de nombreuses espèces marines et terrestres.

Les herbiers marins, des zones indispensables à notre futur

Les herbiers marins constituent un écosystème côtier crucial, offrant une gamme impressionnante de services écosystémiques essentiels à la santé environnementale et à la durabilité des océans. Premièrement, ils agissent comme d'importants puits de carbone, avec un taux bien supérieur à celui des forêts terrestres.

De plus, les herbiers stabilisent les fonds marins et réduisent l'érosion côtière. Leur structure complexe atténue l'impact des vagues et offre une protection contre les tempêtes, protégeant ainsi les littoraux des dommages causés par les événements climatiques

extrêmes.

Sur le plan biologique, ces écosystèmes sont des habitats essentiels pour de nombreuses espèces marines, servant de nurseries pour les poissons et abritant une biodiversité riche qui soutient les chaînes alimentaires marines.

La préservation et la restauration des herbiers marins sont donc indispensables.

Cela suppose, par exemple, de protéger certains alliés étonnants comme les requins tigres car ils maintiennent l'équilibre écologique de ces écosystèmes. En tant que prédateurs au sommet de la chaîne alimentaire, ils régulent les populations de certaines espèces herbivores qui, sans cette prédation, pourraient surpâturer les herbiers marins, compromettre leur santé et leur capacité à stocker le carbone.

La résilience naturelle des coraux

En Nouvelle-Calédonie, l'étude menée par Riccardo Rodolfo-Metalpa, membre de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), révèle des coraux résistants aux conditions environnementales extrêmes. Dans la région de Bouraké, les coraux sont exposés à des températures élevées, à une forte acidité et à de faibles niveaux d'oxygène ; des conditions similaires à celles prévues par les modèles climatiques pour la fin du siècle. Malgré ces conditions défavorables, ces « supers-coraux » montrent une capacité de calcification

remarquable, leur permettant de survivre et de se développer, avec des taux de croissance plus élevés que ceux trouvés dans des environnements à pH plus stable.

Ce phénomène offre des pistes pour comprendre comment les coraux pourraient s'adapter aux changements climatiques futurs et souligne l'importance de protéger ces habitats naturels qui peuvent servir de refuge et de laboratoire pour la recherche scientifique.

Les épaves marines, des sanctuaires de biodiversité

Bien que souvent considérées comme de simples vestiges historiques, les épaves sous-marines, jouent un rôle essentiel dans la conservation de la biodiversité marine, en particulier dans les zones affectées par la pêche intensive. Une étude de 2023 ⁽²⁾ révèle que ces structures subaquatiques agissent comme de véritables sanctuaires pour les espèces marines. L'enquête a montré que la densité de vie marine autour des épaves était de 240% plus élevée comparée à celle des zones de pêche au chalut de fond. Près des épaves, cette densité s'accroît même jusqu'à 340% par rapport aux zones ouvertes à la pêche.

Cette augmentation significative de la biodiversité est due à la structure complexe des épaves qui fournissent à la fois abri, zones de nourrissage et de reproduction pour une variété d'espèces, allant des poissons aux coraux, en passant par divers invertébrés.

Herbiers Marins ©Tswinner/Getty



Élargir l'exploration de l'espace maritime pour assurer sa conservation

Le projet EXTRAPLAC, mis en œuvre par la France depuis 2002, représente une démarche stratégique visant à étendre la limite de son plateau continental au-delà des 200 milles nautiques traditionnels. Cette extension favoriserait une gestion responsable des ressources sous-marines.

La France a déjà pu ainsi agrandir son domaine sous-marin de 151,000 km², ce qui représente un quart de la superficie métropolitaine. Les zones concernées incluent des fonds marins riches en biodiversité et en ressources naturelles non encore pleinement explorées, et dont la protection est de-

venue une priorité face aux pressions environnementales croissantes. L'intérêt de cette approche est de privilégier la protection et l'étude scientifique des écosystèmes marins profonds au lieu de leur exploitation immédiate. Le rôle de la gouvernance maritime a son importance, dans les stratégies globales de lutte contre les changements climatiques

D'autres voies restent à explorer

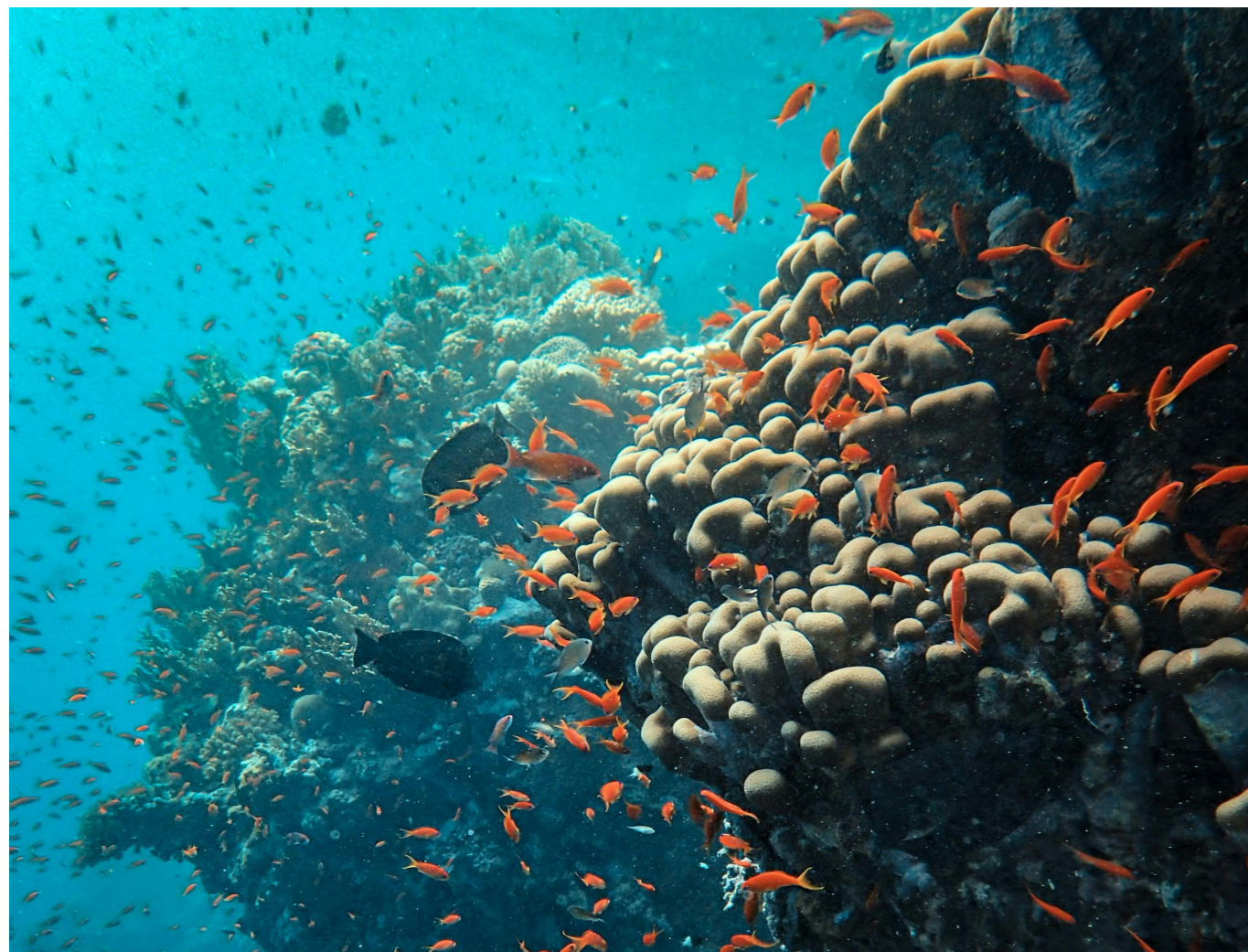
Pour augmenter la capacité des océans à séquestrer le carbone et maintenir le précieux équilibre océan-climat d'autres voies prévoient des interventions concrètes. Entre autres, certains projets envisagent de fertiliser

artificiellement les eaux de surface en ajoutant du fer soluble pour augmenter la production primaire et par conséquent l'absorption de carbone par le phytoplancton.

L'alcalinisation, quant à elle, consiste à ajouter des substances alcalines consommant du CO₂. Mais tout cela reste théorique. Et à grande échelle, les risques d'effets collatéraux négatifs sont supérieurs aux bénéfices potentiels.

Si les avancées technologiques permettent de progresser sur la connaissance scientifique des océans, il n'en demeure pas moins qu'elles ne sauveront pas l'humanité d'un enrayement de la machine climatique. Il ne pourra être stoppé qu'à la source : la réduction des GES émis par nos activités humaines.

Coraux dans l'océan ©Unsplash



Les campagnes D'OPPORTUNITÉ, UN COMPLÉMENT à La RECHERCHE océanique

Par Marion Durand

Des voiliers, des cargos ou certains bâtiments de la Marine nationale contribuent à faire avancer la recherche océanique. Ces navires dits « d'opportunité », dont la vocation n'est pas de faire de la recherche, peuvent collecter des échantillons, mesurer des paramètres physiques ou chimiques des océans ou larguer des flotteurs Argo. Ces collaborations existent depuis quelques années mais posent aujourd'hui des questions éthiques dans des espaces fragiles.

Pour prendre le pouls de l'océan, les navires océanographiques ne sont pas les seuls à collecter des données en mer. Voiliers, bateaux de plaisance, de commerce ou de croisière, cargos, bâtiments de la Marine Nationale peuvent également récupérer des échantillons ou mesurer des paramètres physiques ou chimiques de l'océan (température, salinité, courants, etc.).

On parle de « navires d'opportunité » pour désigner ces bateaux dont la vocation n'est pas de faire de la recherche mais qui profitent de leurs expéditions en mer pour ramener de la donnée, gratuitement ou à peu de frais.

Des personnels de recherche ou des étudiants peuvent aussi embarquer à bord de ces navires. « Les campagnes d'opportunité ne concernent pas seulement les océans, des avions de ligne peuvent aussi être instrumentés pour récolter des données scientifiques, précise Éric Guilyardi, directeur adjoint du LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et

Approches Numériques). Nous n'avons jamais assez de bateaux océanographiques pour être partout, en ce sens, les navires d'opportunité peuvent être utiles et ce type de collaboration n'est pas nouveau ».

Des étudiants sur les bateaux de la Marine nationale

Par exemple, les skippers de courses au large naviguant sur des IMOCA contribuent à la collecte de données scientifiques en déployant des bouées opérées par Météo France à différentes latitudes lors de leurs parcours. Le centre de coordination OceanOPS, l'organisme de surveillance du système mondial d'observation de l'océan, définit les besoins et les zones de déploiement avant chaque départ.

L'association Voiliers sans frontières aide aussi la recherche océanique en larguant, depuis 2012, des flotteurs Argo sur leur route maritime, selon des points géographiques définis par

le programme.

La Mission Bougainville en est un autre exemple. L'Institut de l'océan s'est associé à la Marine nationale pour mener une grande mission d'observation du microbiome océanique dans des zones rarement échantillonnées des océans Indien et Pacifique dans le cadre du programme Plankton Planet.

Cette mission a permis à une dizaine d'étudiants de Sorbonne Université d'embarquer sur les bâtiments de la Marine nationale.

« Pour avoir une vision globale de l'océan, nous ne pouvons pas compter seulement sur les satellites ou sur les bateaux de recherches scientifiques, trop peu nombreux et dont la journée en mer coûte des milliers d'euros », estime l'amiral Christophe Prazuck, directeur de l'Institut de l'Océan. Pour l'ancien chef d'État-major de la Marine nationale, « l'utilisation de ces navires d'opportunité pourrait apporter des observations répétées à une plus grande échelle ».



Mission Bougainville © Sorbonne Université

Sur les bateaux de plaisance, où les navigateurs volontaires n'ont pas toujours les connaissances requises pour manier des équipements scientifiques, il est préférable que les instruments de mesures soient peu volumineux et autonomes. C'est une des limites des campagnes d'opportunité : pour être exploitables pour la science, les données doivent être récoltées selon des protocoles précis.

« Ces campagnes de science participative ont des vertus pédagogiques car elles permettent aux citoyens de comprendre comment la science se fait mais ce qu'on en retire scientifiquement est souvent limité », tempère l'océanographe et climatologue Éric Guilyardi.

Un boîtier autonome sur des voiliers

Pour faciliter l'acquisition de données environnementales à travers la science participative, la start-up Oceanovox développe, en partenariat avec l'Ifremer, un petit boîtier conçu

pour équiper les bateaux de plaisance et utilisable sans connaissances techniques requises pour les utilisateurs. Le boîtier, autonome en énergie, récupère des informations sur la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, la température de l'eau ou l'état de la mer. Une centaine de bateaux sont déjà équipés, essentiellement en Méditerranée et un millier le sera l'année prochaine.

« En France, il y a plus d'un million de bateaux dans nos ports, ce qui offre un maillage et un support intéressant. On met en relation les chercheurs et les bateaux volontaires pour aider la recherche », décrit Antoine Cousot, fondateur d'Oceanovox. Il espère en faire le plus gros réseau mondial d'acquisition de données basé sur la science participative. « Le potentiel est énorme pour la recherche, ces voiliers naviguent dans tous les océans du monde et peuvent récolter des données dans des zones difficiles ».

L'un des avantages de ces bateaux

d'opportunité est financier : un boîtier développé par Oceanovox coûte 3 € par mois quand une campagne océanographique en mer en coûte des milliers.

Mais Antoine Cousot rappelle que ces technologies n'ont pas vocation à « remplacer les expéditions scientifiques mais plutôt d'être un complément » à la recherche. « Nous sommes orientés sur la campagne légère et les bateaux récoltent des données de surface, essentielles pour comprendre l'impact du réchauffement climatique. »

Greenwashing et marchandisation des pôles

Si ce genre de partenariats entre la recherche publique et des plaisanciers ou armateurs existe depuis des décennies, elle soulève de plus en plus des questions éthiques sur l'instrumentalisation de la science à des fins commerciales. De nouveaux acteurs privés valorisent cette « opportunité » auprès de leurs clients, en particulier dans le

cadre du tourisme polaire. C'est le cas de la Compagnie du Ponant, opérateur de tourisme de luxe privé, qui invite des chercheurs à embarquer sur son navire pour des virées en Arctique et en Antarctique.

Si le tourisme polaire est déjà largement décrié par la communauté scientifique, cette invitation lancée aux chercheurs s'apparente, pour certains, à du greenwashing. En avril 2023, le collectif Scientifiques en Rébellion dénonçait une « marchandisation des pôles sous couvert d'aide à la science ».

En septembre dernier, le comité d'éthique du CNRS, saisi par le PDG du CNRS qui avait été interpellé par le Collectif, a rendu un avis sur l'éthique des campagnes d'opportunité proposées par la compagnie touristique. « De manière générale, les campagnes d'opportunité peuvent indéniablement fournir des données scientifiques dont il serait dommage de priver la recherche. Il considère toutefois qu'elles deviennent potentiellement problématiques quand elles sont l'accessoire d'un tourisme qui impacte négativement l'environnement et, plus encore, quand elles servent d'argument pour cautionner voire promouvoir un tel tourisme. »

Si le COMETS recommande aux scientifiques d'être « particulièrement attentifs à faire la balance entre, d'une part, l'apport scientifique de la campagne, et, de l'autre, l'impact environnemental et socioculturel de l'activité à laquelle elle se rattache », il exprime une « profonde réserve à l'égard des campagnes d'opportunité actuellement proposées

par la Compagnie du Ponant sur le navire brise-glace Commandant Charcot en Arctique et en Antarctique. » L'océanographe polaire Marie-Noëlle Houssais regrette que les chercheurs, faute de moyens suffisants, soient contraints de se tourner vers ces partenariats. « On ne va pas combler le manque de moyens dans la recherche en océanographie polaire à partir d'opportunités privées. Lorsqu'on dit qu'on veut des moyens, on veut du temps bateau et sur ce genre de navire il n'y a pas de temps ». La chercheuse du LOCEAN s'interroge aussi sur « l'image renvoyée par la recherche lorsqu'elle s'associe à des croisières de luxe ».

Une pratique à encadrer

Ces débats sur l'éthique des campagnes d'opportunité ont rendu la pratique plus visible mais Éric Guilyardi estime qu'elles ne sont pas plus nombreuses qu'autrefois. Elles changent simplement de nature avec l'arrivée de ces offres de campagnes associées à des activités touristiques en milieux fragiles. « Les données collectées par l'ensemble des navires d'opportunité sont infimes comparées à celles récoltées par la flotte océanographique française. Il n'existe pas de chiffre précis mais on parle seulement de quelques pour-cent ».

Là où les navires d'opportunité collectent des données au gré de leur voyage, les expéditions scientifiques, souvent pluridisciplinaires, définissent une destination précise au service de la recherche. « Nous avons des labo-

ratoires à bord pour faire des mesures très précises et l'expédition est dédiée à la question scientifique que l'on se pose », rappelle le directeur de recherche CNRS.

En début d'année, la flotte océanographique a indiqué vouloir réduire son bilan carbone de 40 % à horizon 2030. Si les campagnes en mer restent indispensables, elles émettent toutefois une importante quantité de CO₂. Dans ce sens, les navires d'opportunité qui empruntent déjà les routes maritimes pour des raisons économiques ou touristiques permettent d'économiser certains déplacements. « Pour récolter des données à l'autre bout du monde, il est préférable de se servir des bateaux qui sont déjà sur place pour éviter des déplacements de plusieurs mois, par exemple pour rejoindre la Nouvelle-Calédonie », poursuit Antoine Cousot.

À l'heure où la recherche océanique se questionne, comme de nombreux secteurs, sur son empreinte environnementale, les campagnes d'opportunité seront peut-être davantage plébiscitées par les chercheurs, ce qui pousse les tutelles à cadrer une pratique encore informelle. « Le Comité d'Éthique du CNRS (COMETS) recommande en outre à l'institut de se doter d'un cadre général applicable aux campagnes d'opportunité qui seront in fine considérées comme acceptables. Un tel cadre présenterait l'avantage de guider les personnels de recherche et les délégations régionales », conclut l'avis du comité d'éthique.

Bateau à voile naviguant dans la mer Méditerranée au coucher du soleil © Giovanni Rinaldi, Shutterstock





LISTE DES ACRONYMES

INSTITUTIONS & LABORATOIRES FRANÇAIS

CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique - www.cnrs.fr
INSU - Institut National des Sciences de l'Univers - www.insu.cnrs.fr
FOF - Flotte Océanographique Française - www.flotteoceanographique.fr
GENAVIR - Gestion des Navires de Recherches au service de l'océanographie, opérateur principal de la FOF et filiale d'IFREMER - www.genavir.fr
IFREMER - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer - www.ifremer.fr
IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace Sciences du Climat - www.ipsl.fr
IRD - Institut de Recherche pour le Développement - www.ird.fr
LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique - www.lmd.ipsl.fr
LOCEAN - Laboratoire d'Océanographie et du Climat Expérimentations et Approches Numériques - www.locean.ipsl.fr
LOPS - Laboratoire d'Océanographie Physique et Spatiale - www.umr-lops.fr
MNHN - Muséum National d'Histoire Naturelle - www.mnhn.fr
SU - Sorbonne Université - www.sciences.sorbonne-universite.fr

INSTITUTIONS & LABORATOIRES INTERNATIONAUX

EURO-ARGO - Infrastructure de recherche européenne pour Argo - www.euro-argo.eu
COI - Commission Océanographique Internationale (IOC) - www.ioc.unesco.org
OCE - Bureau pour L'Éducation au Changement climatique - www.oce.global
OCEANOPS - Commission technique mixte OMM-COI d'océanographie et de météorologie maritime - www.ocean-ops.org
OMM - Organisation Météorologique Mondiale - wmo.int
UNESCO - Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture - www.unesco.org

PROGRAMMES OCÉANOGRAPHIQUES

ARGO - programme international d'océanographie opérationnelle pour le déploiement de flotteurs profilants autonomes - www.argo.net
GOOS - Global Ocean Observing System - www.goosocean.org
OOPC - Ocean Observations Physics and Climate Panel - www.gcos.wmo.int/en/ocean-observations-physics-and-climate-panel
WOCE - World Ocean Circulation Experiment - www.ewoce.org
MISSION BOUGAINVILLE - www.mission-bougainville.fr

AUTRES ORGANISATIONS

Association Voiles Sans Frontières - Organisation de solidarité internationale - www.voilessansfrontieres.org
Scientifiques en Rébellion - branche française de « Scientist Rebellion », collectif de scientifiques en lutte contre le changement climatique - www.scientifiquesenrebellion.fr
Vendée Globe Organisation de la course à la voile autour du monde, en solitaire, sans escale ni assistance - www.vendeeglobe.org

GLOSSAIRE DES PETITS MOTS

Alizés. Vents soufflant d'est en ouest aux latitudes subtropicales, entre 10° et 30° de latitude nord et sud.

Altimétrie. Mesure par radar de la distance entre le satellite et la surface de la mer.

Bathymétrie. Science s'intéressant aux reliefs et profondeurs des océans afin de cartographier les fonds sous-marins.

Bathysonde ou sonde C.T.D. Outil de base de l'océanographie, mesure la température (T), la conductivité (C), qui informe sur la salinité ambiante, et parfois le taux d'oxygène dissous en fonction de la pression, que l'on interprète comme une profondeur (D pour depth). Sa technologie a considérablement évolué avec les progrès de l'électronique.

Colonne d'eau. Désigne le volume d'eau compris entre la surface et le fond de l'océan.

Courantomètre. Appareil servant à la mesure de la vitesse et de la direction des courants.

Densité. La densité ou masse volumique (en kg/m³) de l'eau de mer dépend de la relation entre salinité, température et pression. Dans la colonne d'eau sur la verticale, une masse d'eau dense est située en-dessous d'une masse d'eau légère.

Force de Coriolis. Effet de la rotation terrestre sur tous les corps se déplaçant à sa surface, plus forte aux pôles qu'à l'équateur. Elle entraîne la déviation des courants marins vers la droite dans l'hémisphère Nord et vers la gauche dans l'hémisphère Sud.

Gyre océanique. Grand tourbillon d'eau formé à partir d'un ensemble de courants marins, provoqué par la force de Coriolis.

Joule. Unité de mesure (symbole J) de travail, d'énergie et de quantité de chaleur. Une calorie vaut environ 4,18 joules

Photosynthèse. Processus biologique des cellules contenant de la chlorophylle, qui convertit la lumière du soleil, le CO₂, l'eau et les nutriments en matière végétale et en dioxygène.

Poussée d'Archimède. Force selon laquelle tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, appliquée à son centre de gravité. L'intensité de cette force est égale à celle du poids du volume de fluide déplacé et s'oppose au poids de l'objet

PSU. Practical Salinity Units, unité de mesure de la salinité considérée comme la quantité de sels dissous dans l'eau de mer. 1 PSU correspond à 1 gramme de sel sec par kilogramme d'eau.

Rayonnement infrarouge. Rayonnement électromagnétique invisible à l'œil humain, dont les longueurs d'ondes sont comprises entre la lumière visible (0,78 micromètres) et les micro-ondes (1000 micromètres).

Stratification. Couche de séparation entre deux masses d'eau ayant des propriétés différentes (température, salinité, densité, oxygène), formant une barrière au mélange.

Thermocline. Couche dans laquelle la température verticale varie rapidement, marquant la limite entre les eaux profondes, froides et les eaux de surface, chaudes.

Upwelling. Remontée d'eaux profondes et froides, enrichies en nutriments, venant combler le déplacement d'eaux poussées en surface par les vents atmosphériques.



BIBLIOGRAPHIE & RESSOURCES

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- (R1) Biastoch, A. et al. (2024). "The Agulhas Current System as an Important Driver for Oceanic and Terrestrial Climate". In: von Maltitz, G.P., et al. Sustainability of Southern African Ecosystems under Global Change. Ecological Studies, vol 248. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10948-5_8
- (R2) Chen, Y., Speich, S., & Laxenaire, R.(2022). Formation and transport of the South Atlantic subtropical mode water in eddy-permitting observations. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 127, e2021JC017767. <https://doi.org/10.1029/2021JC017767>
- (R3) Moat, B. I., Smeed, D. A., Frajka-Williams, E., Desbruyères, D. G., Beaulieu, C., Johns, W. E., Rayner, D., Sanchez-Franks, A., Baringer, M. O., Volkov, D., Jackson, L. C., and Bryden, H. L. "Pending recovery in the strength of the meridional overturning circulation at 26°N", *Ocean Sci*, 16, 863–874, (2020). <https://doi.org/10.5194/os-16-863-2020>
- (R4) Caesar, L., Rahmstorf, S., Robinson, A. et al. (2018). "Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation". *Nature* 556, 191–196. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>
- (R5) Fox-Kemper, B. et al. (2008). "Parameterization of Mixed Layer Eddies. Part I: Theory and Diagnosis", *Journal of Physical Oceanography*
- (R6) Griffies, S. M., and Coauthors, 2015: Impacts on Ocean Heat from Transient Mesoscale Eddies in a Hierarchy of Climate Models. *J. Climate*, 28, 952–977, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00353.1>.
- (R7) Hickman et al., (2023). "Shipwrecks act as de facto marine protected areas in areas of heavy fishing pressure", *Marine Ecology*
- (R8) Jeandel, Catherine, et Rémy Mosseri, éditeurs. "Le climat à découvert". CNRS Éditions, 2011, <https://doi.org/10.4000/books.editions-cnrs.11316>.
- (R9) Lebrato, M., Garbe-Schönberg, D., Müller, M.N., Blanco-Ameijeiras, S., Feely, R.A., Lorenzoni, L., Molinero, J.C., Bremer, K., Jones, D.O.B, Iglesias-Rodriguez, M.D., Greeley, D., Lamare, M.D. Paulmier, A., Graco, M., Cartes, J.E., Barcelos e Ramos, J., de Lara, A., Sanchez-Leal, R., Jimenez, P., Pappazzo, F.E., Hartman, S.E., Westernströer, U., Küter, M., Benavides, R., da Silva, A.F., Bell, S., Payne, C., Olafsdottir, S., Robinson, K.L., Jantunen, L.M., Korablev, A., Webster, R.J., Jones, E., Gilg, O., Bailly du Bois, P., Betdowski, J., Ashjian, C., Daly-Yahia, N., Twining, B.S., Chen, X.G., Tseng, L.C., Hwang, J.S., Dahms, H.U., Oschlies, A. (2020). « Global variability in seawater Mg:Ca and Sr:Ca ratios in the modern ocean". *PNAS* 2019-18943RR. doi:10.1073/pnas.1918943117
- (R10) Lehman, Jessica. (2020). "Sea Change: The World Ocean Circulation Experiment and the Productive Limits of Ocean Variability". *Science, Technology, & Human Values*. 46. 016224392094993. 10.1177/0162243920949932.
- (R11) M. Levy et L.Bopp (2007). "Turbulence dans l'océan", *La Recherche* no 414
- (R12) Lumpkin, R., and K. Speer, 2007: "Global Ocean Meridional Overturning". *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 2550–2562, <https://doi.org/10.1175/JPO3130.1>
- (R13) Mahadevan A., (2016). "The impact of submesoscale physics on primary productivity of plankton", *Annual Review of Marine Science*.
- (R14) McWilliams James C. 2016. "Submesoscale currents in the ocean". *Proceedings of the Royal Society*, A, 47220160117, <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0117>
- (R15) Meredith, M.P. (2019). "The global importance of the Southern Ocean, and the key role of its freshwater cycle". *Ocean Challenge*, 23(2), 27-32.
- (R16) Olbers, D., & Visbeck, M. (2005). "A model of the zonally averaged stratification and overturning in the Southern Ocean". *Journal of physical oceanography*, 35(7), 1190-1205.
- (R17) Reithmaier, G.M.S., Cabral, A., Akhand, A. et al.(2023). "Carbonate chemistry and carbon sequestration driven by inorganic carbon outwelling from mangroves and saltmarshes", *Nat Commun* 14, 8196 (2023)
- (R18) Rouillet, Guillaume, et Patrice Klein.17. "La turbulence océanique de méso-échelle". *Le climat à découvert*, édité par Catherine Jeandel et Rémy Mosseri, CNRS Éditions, 2011, <https://doi.org/10.4000/books.editions-cnrs.11367>.
- (R19) Sarmineto J.L., Gruber N. (2006), "Ocean biogeochemistry dynamics", Princeton University Press, 503 p.
- (R20) Speer, K., Rintoul, S.R., & Sloyan, B. (2000). "The diabatic Deacon cell". *Journal of physical oceanography*, 30(12), 3212-3222.
- (R21) van Sebille Erik et al (2020). "The physical oceanography of the transport of floating marine debris". *Environ. Res. Lett.* 15 023003
- (R22) von Schuckmann, K., Minière, A., Gues, F., Cuesta-Valero, F. J., Kirchengast, G., Adusumilli, S., Straneo, F., Ablain, M., Allan, R. P., Barker, P. M., Beltrami, H., Blazquez, A., Boyer, T., Cheng, L., Church, J., Desbruyeres, D., Dolman, H., Domingues, C. M., García-García, A., Giglio, D., Gilson, J. E., Gorfer, M., Haimberger, L., Hakuba, M. Z., Hendricks, S., Hosoda, S., Johnson, G. C., Killick, R., King, B., Kolodziejczyk, N., Korosov, A., Krinner, G., Kuusela, M., Landerer, F. W., Langer, M., Lavergne, T., Lawrence, I., Li, Y., Lyman, J., Marti, F., Marzeion, B., Mayer, M., MacDougall, A. H., McDougall, T., Monselesan, D. P., Nitzbon, J., Otosaka, I., Peng, J., Purkey, S., Roemmich, D., Sato, K., Sato, K., Savita, A., Schweiger, A., Shepherd, A., Seneviratne, S. I., Simons, L., Slater, D. A., Slater, T., Steiner, A. K., Suga, T., Szekely, T., Thiery, W., Timmermans, M.-L., Vanderkelen, I., Wijffels,

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

- S. E., Wu, T., and Zemp, M. (2023). "Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?", *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 1675–1709, <https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023>
- (R23) van Westen René M., Michael Kliphuis, Henk A. Dijkstra (2024). "Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course", *Science Advances*, vol. 10, issue 6

RAPPORTS

- "Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate", mars 2023. 6ème rapport du GIEC spécial océan & cryosphère <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

RESSOURCES NUMÉRIQUES COMPLÉMENTAIRES

Sur la composition de l'eau de mer

www.ird.fr/la-composition-de-leau-de-mer-une-histoire-reecrire

Sur le couplage océan/atmosphère à méso-échelle, par le CNRM

www.umr-cnrm.fr/spip.php?rubrique170

Sur les réseaux d'observations

Argo : a window into the ocean" :

www.oceanops.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=a170a0d522bb42f1a019e4e473cf1bdd

Animal Borne Ocean Sensors : www.anibos.com/

Marine Mammals Exploring the Oceans Pole to Pole: www.meop.net

Observing the Ocean : www.coriolis.eu.org/Observing-the-Ocean/MARINE-MAMMALS

Sur l'océan Austral et Courant Circumpolaire Antarctique

www.monoceanetmoi.com/themes/ocean_austral/

www.un.org/depts/los/global_reporting/WOA_RPROC/Chapter_36H.pdf

www.argonautica.jason.oceanobs.com/html/argonautica/fiches/circumpolaire2017_fr.html

www.insu.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/quels-liens-entre-courant-circumpolaire-antarctique-et-climat-global

www.coriolis.eu.org/Science2/Atlantic-Ocean/GOODHOPE-SAMOC

www.tos.org/oceanography/article/southern-ocean-warming

www.asoc.org/learn/welcome-to-the-southern-ocean/

www.public.lanl.gov/wilbert/Research/SouthernOcean.html

www.legos.omp.eu/rosame/en/research/monitoring-of-antarctic-circumpolar-current/

Sur le changement climatique

"En quoi consistent les changements climatiques ?" par les Nations Unies

www.un.org/fr/climatechange/what-is-climate-change

"Le climat entre nos mains : océan et cryosphère" par l'OCE, 2019

www.oce.global/sites/default/files/2024-03/OCE_Ocean%20et%20cryosphere.pdf

"Le déséquilibre énergétique de la Terre et ses implications". Colloque WCRP 2018

www.mercator-ocean.eu/actualites/colloque-wcrp-desequilibre-energetique-terre-implications/

"Émissions de gaz à effet de serre par activité - Données annuelles de 1990 à 2022" - INSEE

www.insee.fr/fr/statistiques/2015759#tableau-figure1

En vidéo

"Qui réchauffe le climat (et comment) ?" Ft. Le Réveilleur

www.youtube.com/watch?v=GVJRZql6h2k

en ligne sur www.oceansconnectes.org

www.oceansconnectes.org/observer-locean-grace-aux-yeux-des-animaux-marins/

www.oceansconnectes.org/cartographie-ocean-austral-secrets/

www.oceansconnectes.org/ia-circulation-oceans/

www.oceansconnectes.org/portrait-karina-von-schuckmann-locean-est-une-sentinelle-du-rechauffement-global/

www.oceansconnectes.org/les-epaves-marines-un-refuge-inattendu-pour-la-biodiversite-face-a-la-peche-au-chalut-destructrice/

www.oceansconnectes.org/plus-grand-herbier-marin-requins/

www.oceansconnectes.org/en-nouvelle-caledonie-des-super-coraux-resistant-a-des-conditions-extremes/

www.oceansconnectes.org/les-epaves-marines-un-refuge-inattendu-pour-la-biodiversite-face-a-la-peche-au-chalut-destructrice/



CRÉDITS

CRÉDITS PHOTOS

photo de couverture ©AdobeStock_Hugo généré avec l'aide de l'IA

CHAPITRE 1

photo de couverture ©TS via Firefly, généré avec l'aide de l'IA

page 11 - « Le Climat Entre Nos Mains – Océan et Cryosphère, Manuel à destination des enseignants du primaire et du secondaire », © Office for Climate Education, Paris, 2019

page 12 - Système climatique, processus et interactions entre les sphères terrestres. © World Ocean Review #1, maribus GmbH, Hamburg 2010 <https://worldoceanreview.com/en/>

page 14 - © Photo Marguerite Castel

page 15 - Le cycle de l'eau © Fiches d'information, Tome 2 - Océan & Climat 2016

page 16 - Portrait de Hubert Reeves © La Terre vue du coeur

page 17 - Zoom sur l'Atlantique © Fiches d'information, Tome 2 - Océan & Climat 2016

pages 18-19 - Représentation schématique de la circulation thermohaline globale © Rick Lumpkin, NOAA/AOML

CHAPITRE 2

photo de couverture Le navire océanographique hauturier « Pourquoi Pas? » de l'Ifremer, construit en 2005 et long de 107,6 mètres, est opéré par GENAVIR, filiale de l'institut. Il est ici dans le sud du Groenland pour la campagne GEOVIDE 2014, une campagne OVIDE mêlant la biogéochimie ©GEOVIDE 2014, Pascale Lherminier, Ifremer

page 23 - Les marins de GENAVIR préparent la descente de la bathysonde à bord du navire Pourquoi Pas? durant la campagne OVIDE 2018 © Lherminier Pascale, Ifremer

page 24 - Première carte du Gulf Stream représenté (en gris foncé) par Benjamin Franklin et Timothy Folger en 1769 © Library of Congress Géographe and Map Division Washington DC 20540

page 25

(haut) - Carte de la section OVIDE 2018 reliant le Portugal au Groenland. Tous les 25 milles, une « station » est effectuée et la rosette est plongée à plusieurs profondeurs pour prélever des échantillons d'eau et faire des profils de température et de salinité en fonction de la pression. © OVIDE 2018

(bas) - Equipe scientifique de la campagne OVIDE 2018 © Simon Barbot - Ifremer - OVIDE 2018

pages 26-27 - Schématisation de la circulation thermohaline globale en Atlantique Nord (AMOC). Les branches hautes de l'AMOC sont représentées par les flèches rouges © Pascale Lherminier, Ifremer

page 29 - Herlé Mercier (à gauche) et Pascale Lherminier (à droite) © Photo Maud Lénéé-Corrèze

page 30 - Un profleur Arvor est mis à l'eau depuis le navire « Pourquoi Pas ? », le plus grand navire hauturier de la Flotte Océanographique Française. Ces flotteurs récoltent tous les 10 jours, des données (CTD) de 2000 mètres de profondeur jusqu'à la surface, avec une autonomie de cinq à sept ans © Olivier Dugornay - Ifremer

page 31

(haut) - La rosette est relevée et les échantillons d'eau de mer prélevés seront récupérés et vérifiés par les scientifiques © OVIDE - Ifremer

(bas) Session de travail entre scientifiques de plusieurs disciplines au cours de la campagne GEOVIDE 2014 © GEOVIDE 2014 - Ifremer

page 32 - Schéma de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique obtenu avec les mouillages (en jaune) du réseau RAPID-AMOC à 26°N © NOC Southampton

CHAPITRE 3

photo de couverture © Pexels_Rafaelpaull_4797134

page 38 - Le navire océanographique français Marion Dufresne en pleine tempête, fait route vers l'océan Austral pour une campagne océanographique © Sabrina Speich, LMD-ENS

pages 40-41

(haut) - Schéma de la circulation globale de retournement autour de l'océan Austral. La couleur indique les plages de densité approximatives. Rouge : supérieure, à 27.0 ; jaune : intermédiaire, entre 27.0 et 27.6 ; vert : profond, entre 27.6 et 28.15 ; bleu : inférieur à 28.15. La surface grise avec des bords en pointillés correspond à une densité de 27,6 à 32°S, séparant la transformation des cellules supérieures et inférieures dans l'océan Austral (ligne en pointillé dans la Fig. 3, en haut). Les flèches en pointillés indiquent les échanges entre l'Inde et l'Atlantique vers l'ouest entre l'Afrique et l'ACC. Les cellules subtropicales peu profondes ne sont pas incluses © Lumpkin and Speer, 2007

(bas) - L'océan Austral vu sur une projection ininterrompue de Spilhaus. Contrairement aux projections conventionnelles, celle-ci représente l'océan bordé de terres. La circulation thermohaline mondiale est représentée sous forme de bande dessinée, avec le flux de la couche supérieure en rouge et le flux de la couche inférieure en bleu © Meredith et al., 2019

page 42 - Des dizaines de milliers de courants océaniques sont représentés dans cette visualisation scientifique © NASA

page 43 - Tourbillons de l'océan Pacifique observés par AVISO © CNES/CLS 2014

page 44 - Vortex observé au coeur d'un bloom phytoplanctonique © Sabrina Speich

page 45 - Vue par satellite du Gulf Stream et de ses tourbillons. Les eaux chaudes sont en rouge, les eaux froides sont en bleu © NASA

CHAPITRE 4

photo de couverture Le réchauffement climatique global vu en bandes, sur la période 1850-2023, montre une augmentation des températures mondiales de plus de 1.2°C ©Ed Hawkins, Université de Reading, UK

page 49 - Présentation schématique de l'inventaire de la chaleur terrestre pour le déséquilibre énergétique positif actuel de la Terre (EEI) d'origine anthropique au sommet de l'atmosphère (TOA). La répartition relative (en %) de l'inventaire thermique de la Terre pour les différentes composantes est donnée pour l'océan (supérieur : 0-700 m, intermédiaire : 700-2000 m, profond : > 2000 m), la terre, la cryosphère (glace ancrée et flottante), l'atmosphère et l'IEE pour les périodes 2006-2020 et 1971-2020 (pour cette dernière période, les valeurs sont fournies entre parenthèses). Le gain de chaleur total (en rouge) sur la période 1971-2020 est obtenu à partir de l'inventaire de la chaleur terrestre © von Schuckmann et al., 2023

page 50 - Anomalie de température de surface de la mer du mois de juillet 2023, mesurée par le satellite ERA-5 comparativement à la période de référence 1991-2020 d'après les données ERA5. ©Copernicus Climate Change Service/ECMWF

page 51 - Cartographie des changements de température, chaque décennie de 1850 à 2023 © Ed Hawkins - Université de Reading, UK

page 52 - Changements climatiques observés sur les 2023 dernières années : variations de la teneur atmosphérique en CO₂ et de la température globale © Ed Hawkins - Université de Reading, UK

page 54 - Iceberg en océan Austral © Sabrina Speich

page 55 et 57 - Julie Deshayes © Photos Marion Durand

page 58 - ©TS via Firefly, généré par IA

page 60 - Changements projetés de la température maximale journalière annuelle, de l'humidité totale moyenne annuelle de la colonne du sol et des précipitations maximales annuelles sur un jour à des niveaux de réchauffement global de 1,5°C, 2°C, 3°C et 4°C par rapport à la période 1850-1900. © Figure 2, Rapport de Synthèse AR6 « Climate Change », GIEC IPCC 2023

page 61 - © Leah-Anne Thompson

CHAPITRE 5

photo de couverture - ©killykoon_généré par IA

page 65 - (haut) Bouée PIRATA sur le pont. Les capteurs atmosphériques de surface installés sur la bouée mesurent les éléments suivants : vitesse et direction du vent, précipitation, radiation solaire, humidité et température de l'air. Ils constituent une station météorologique fixée sur les bouées du réseau PIRATA. Campagne PIRATA-FR21. PIRATA est un réseau international maintenu pour l'étude des interactions océan-atmosphère dans l'Atlantique tropical et de leur rôle dans la variabilité climatique régionale. © IRD - Bourlès, Bernard - (bas) : Sections hydrographiques et stations de mesures effectuées pendant le programme WOCE. Source : Atlas WOCE de l'océan Austral. Reproduction autorisée © WOCE.

page 66 - Le satellite franco-américain Surface Water and Ocean Topography (SWOT) lancé par le CNES et la Nasa - ©CNES/Mira Production, 2022

page 67 - Le Système Global d'Observation de l'Océan (GOOS) - © IOC-GOOS

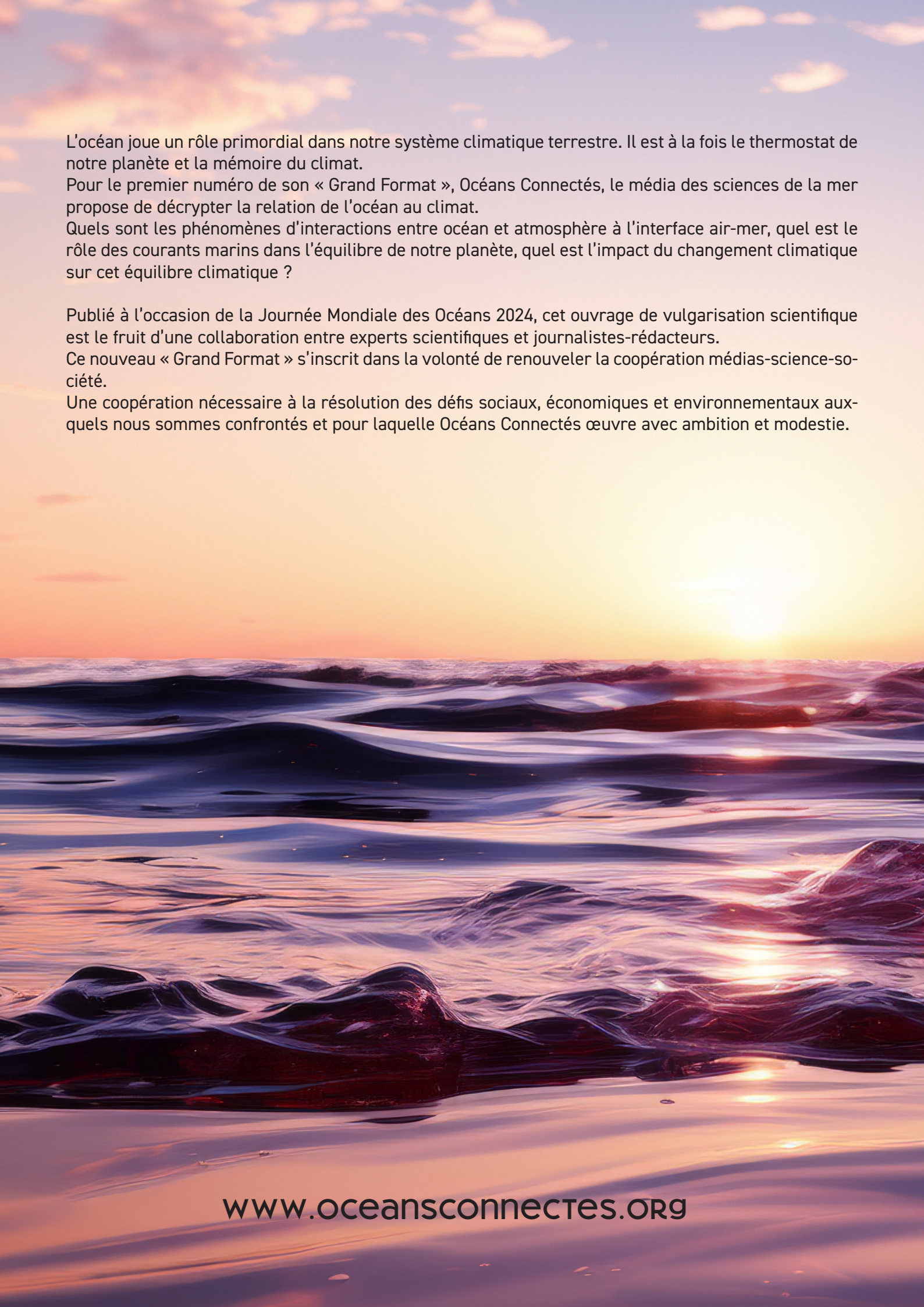
page 68 - ©Thierry Ryo

page 69 - Herbiers Marins ©Tswinner/Getty

page 70 - Coraux dans l'océan ©Unsplash

page 72 - Mission Bougainville à bord d'un navire de la Marine Nationale © Yannick Bisson / Marine Nationale / Défense

page 73 - Bateau à voile naviguant dans la mer Méditerranée au coucher du soleil © Giovanni Rinaldi, Shutterstock_1682439421



L'océan joue un rôle primordial dans notre système climatique terrestre. Il est à la fois le thermostat de notre planète et la mémoire du climat.

Pour le premier numéro de son « Grand Format », Océans Connectés, le média des sciences de la mer propose de décrypter la relation de l'océan au climat.

Quels sont les phénomènes d'interactions entre océan et atmosphère à l'interface air-mer, quel est le rôle des courants marins dans l'équilibre de notre planète, quel est l'impact du changement climatique sur cet équilibre climatique ?

Publié à l'occasion de la Journée Mondiale des Océans 2024, cet ouvrage de vulgarisation scientifique est le fruit d'une collaboration entre experts scientifiques et journalistes-rédacteurs.

Ce nouveau « Grand Format » s'inscrit dans la volonté de renouveler la coopération médias-science-société.

Une coopération nécessaire à la résolution des défis sociaux, économiques et environnementaux auxquels nous sommes confrontés et pour laquelle Océans Connectés œuvre avec ambition et modestie.