

Océanographie - Mise en ligne anticipée

CONTEXTE : Températures de surface de la mer issues d'une simulation avec le modèle climatique mondial CM2.6 du laboratoire de dynamique des fluides géophysiques de Princeton, aux États-Unis. Les eaux chaudes du Gulf Stream apparaissent en rouge.

INTRODUCTION

En 1751, le capitaine d'un navire anglais spécialisé dans la traite des esclaves fit une découverte historique. Alors qu'il naviguait par 25°N dans l'Atlantique Nord subtropical, le capitaine Henry Ellis fit descendre dans les profondeurs, à travers les eaux chaudes de surface, un "godet jaugeur de mer", conçu et mis à sa disposition par le révérend Stephen Hales, un ecclésiastique britannique. Au moyen d'une longue corde et d'un système de vannes, l'eau provenant de différentes profondeurs pouvait être remontée sur le pont où sa température était lue sur un thermomètre intégré. À sa grande surprise, le capitaine Ellis constate que les eaux profondes sont glaciales.

Il fait part de ses découvertes au révérend Hales dans une lettre : "Le froid augmenta considérablement, proportionnellement aux profondeurs, jusqu'à ce qu'il descende à 3900 pieds, d'où le mercure du thermomètre remonta à 53 degrés (Fahrenheit) ; et bien que je l'aie ensuite enfoncé jusqu'à la profondeur de 5346 pieds, soit un mille et 66 pieds, il ne remonta pas plus bas". Il s'agissait des premières mesures de température jamais enregistrées dans les profondeurs de l'océan. Elles ont révélé ce que l'on sait aujourd'hui être une caractéristique physique fondamentale et frappante de l'océan mondial : les eaux profondes sont toujours froides. Les eaux chaudes des tropiques et des subtropiques sont confinées à une mince couche à la surface ; la chaleur du soleil ne réchauffe pas lentement les profondeurs pendant des siècles ou des millénaires, comme on pourrait s'y attendre.

La lettre d'Ellis à Hales suggère qu'il n'avait aucune idée de la portée de sa découverte. Il écrit : "Cette expérience, qui semblait au départ n'être qu'un simple aliment pour la curiosité, nous est devenue entre-temps très utile. Elle nous a permis d'alimenter notre bain froid et de refroidir nos vins ou notre eau à volonté, ce qui nous est très agréable dans ce climat brûlant" (Ellis, 1751).

En fait, Ellis avait trouvé la première indication de la circulation de retournement de l'océan, le système de courants océaniques profonds qui fait circuler les eaux froides d'origine polaire autour de la planète.

Mais ce n'est que plusieurs décennies plus tard, en 1797, qu'un autre Anglais,

Il est impossible d'expliquer ce degré de froid au fond de la mer dans la zone torride par une autre hypothèse que celle de courants froids provenant des pôles ; et l'utilité de ces courants pour tempérer les chaleurs excessives de ces climats est trop évidente pour nécessiter une quelconque illustration" (Thompson, 1797).

Aujourd'hui, plus de 200 ans plus tard, nous avons une compréhension raisonnable du système complexe de la circulation océanique profonde et, ce que Rumford a trouvé si évident, du rôle qu'il joue dans le climat. Cependant, certaines énigmes majeures demeurent et pourraient être d'une importance fondamentale pour notre avenir.

CINQUANTE FOIS LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE HUMAINE

Dans cet article, j'aborde la branche atlantique de la circulation de retournement globale, qui joue un rôle majeur dans les changements climatiques passés et très probablement futurs. Il s'agit de l'AMOC (pour Atlantic Meridional Overturning Circulation, ou circulation méridienne de retournement de l'Atlantique). Son flux d'eaux de surface chaudes vers le nord et son flux de retour froid en profondeur font de l'Atlantique Sud une curiosité : il transporte la chaleur des hautes latitudes méridionales vers l'équateur, du froid vers le chaud (**figure 1**). Tous les autres bassins océaniques se comportent "normalement".

en éloignant l'excès de chaleur des tropiques gorgés de soleil.

Dans l'Atlantique Nord, la circulation de retournement déplace la chaleur à un rythme d'un pétawatt (10^{15} Watt ; Trenberth et al., 2019), soit environ 50 fois la consommation d'énergie de toute l'humanité, ou 3,5 fois le taux d'absorption de la chaleur océanique mondiale au cours des dernières décennies en raison du réchauffement climatique causé par l'homme (Z. Li et al., 2023). Il fournit de la chaleur jusqu'à la région située au sud du Groenland et de l'Islande, et même plus au nord, au-delà de l'Islande, dans les mers nordiques. Là, elle cède généreusement sa chaleur aux vents froids jusqu'à ce que

Le comte Rumford a publié une explication correcte de la découverte "utile" d'Ellis : "Il semble extrêmement difficile, si ce n'est

l'eau soit si froide et si dense qu'elle s'enfonce dans les abysses, jusqu'à une profondeur comprise entre 2 000 et 3 000 mètres. Là, elle "s'écoule comme un grand fleuve sur toute la longueur de l'Atlantique" (Broecker, 1987). La chaleur libérée dans l'atmosphère rend la région de l'Atlantique Nord beaucoup trop chaude pour sa latitude, en particulier sous le vent de l'océan (figure 2). C'est aussi la principale raison pour laquelle l'hémisphère nord est en moyenne $\sim 1,4^{\circ}\text{C}$ plus chaud que l'hémisphère sud, et pourquoi l'équateur thermique, la latitude où la Terre est la plus chaude, se situe à $\sim 10^{\circ}$ au nord de l'équateur

géographique (Feulner et al., 2013).

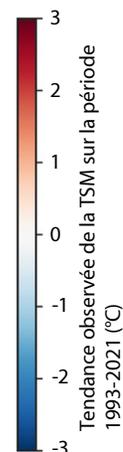
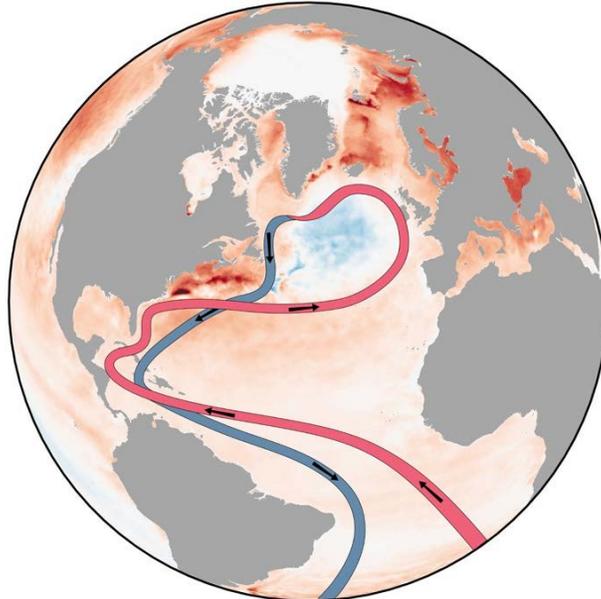


FIGURE 1. Ce graphique présente un schéma très simplifié de la région de l'Atlantique. Circulation méridienne de retournement (AMOC) avec en toile de fond l'évolution de la température de surface de la mer depuis 1993, d'après [micrus.eu/](https://www.micrus.eu/).



La température n'est pas le seul élément clé de l'AMOC, le deuxième facteur est la salinité : plus l'eau est salée, plus elle est dense. La salinité est donc un facteur important pour l'enfoncement décrit ci-dessus. C'est pourquoi cette circulation de retournement est également appelée circulation *thermohaline*, c'est-à-dire une circulation entraînée par des différences de température et de salinité, contrairement à la circulation entraînée par le vent et les courants de marée. Alors que la température a une influence stabilisatrice sur l'AMOC, la salinité a le pouvoir de la déstabiliser.

L'HISTOIRE DE DEUX INSTABILITÉS

En 1961, l'océanographe américain Henry Stommel (Stommel, 1961) a constaté que la salinité des eaux de l'Atlantique conduisait à un point de basculement de l'AMOC, un phénomène qui a de nouveau fait la une des journaux l'année dernière et cette année. L'eau s'enfonce dans l'Atlantique Nord parce qu'elle est suffisamment salée (contrairement à ce qui se passe dans le Pacifique Nord ; Warren, 1983). L'eau est salée parce que l'AMOC apporte de l'eau salée du Pacifique Nord.

Les régions subtropicales sont des régions d'évaporation nette, tandis que les latitudes plus élevées sont des régions de précipitations nettes. En d'autres termes, l'AMOC circule parce que l'Atlantique Nord est salé, et il est salé parce que l'AMOC circule. La poule et l'œuf ou, en termes plus techniques, un effet de rétroaction auto-entretenu.

Cela fonctionne également dans l'autre sens : Si l'Atlantique Nord devient moins salé en raison d'un afflux d'eau douce (pluie ou eau de fonte), l'eau devient moins dense et l'AMOC ralentit. L'eau douce apporte donc moins de sel à la région, ce qui ralentit encore l'AMOC. Ce processus est appelé rétroaction du transport de sel. Au-delà d'un seuil critique, il se transforme en un cercle vicieux auto-amplifié et l'AMOC s'arrête. Ce seuil est le point de basculement de l'AMOC (appelé bifurcation de Stommel dans la **figure 3**). Comme l'a écrit Stommel en 1961 : "Le système est intrinsèquement riche en possibilités de spéculation sur les changements climatiques.

Le modèle de Stommel se composait simplement d'une boîte pour les hautes latitudes et d'une boîte pour les régions subtropicales

qui étaient reliées par un flux de retournement proportionnel à la différence de densité entre elles. Le modèle a prédit ce flux ainsi que la température, la salinité et la densité dans les deux boîtes. La **figure 3** montre la force d'équilibre de l'AMOC telle qu'elle est déterminée par le modèle de Stommel et le point de basculement qu'il a trouvé.

Pour les modèles en boîte comme celui de Stommel, les courbes d'équilibre peuvent être calculées analytiquement - la solution pour la courbe verte est simplement une parabole. Pour déterminer les états d'équilibre d'un modèle complexe, de l'eau douce est ajoutée à l'Atlantique Nord à un rythme qui augmente très lentement (par exemple, de 0,1 Sv en 2 000 ans ; 1 Sv = 10 m s^{-3}) afin de rester proche de l'équilibre et de voir où les rétroactions internes commencent à dominer l'affaiblissement, ce qui se produit au-delà du point de basculement. Une équipe de chercheurs néerlandais d'Utrecht a mis au point des méthodes pour calculer directement les états d'équilibre dans des modèles océaniques tridimensionnels (Dijkstra et al., 1995), mais elles ne fonctionnent pas dans des modèles couplés complexes.

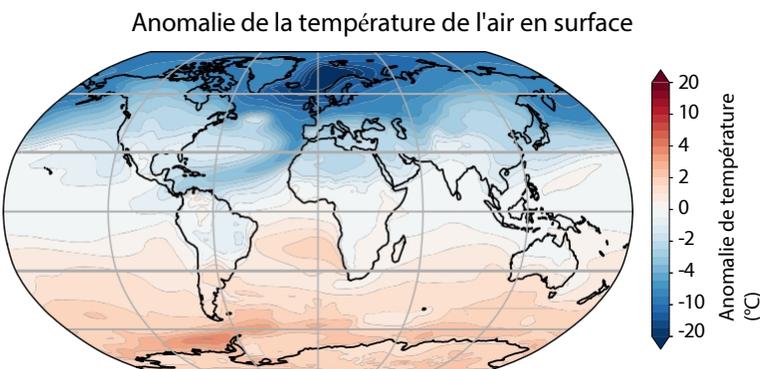
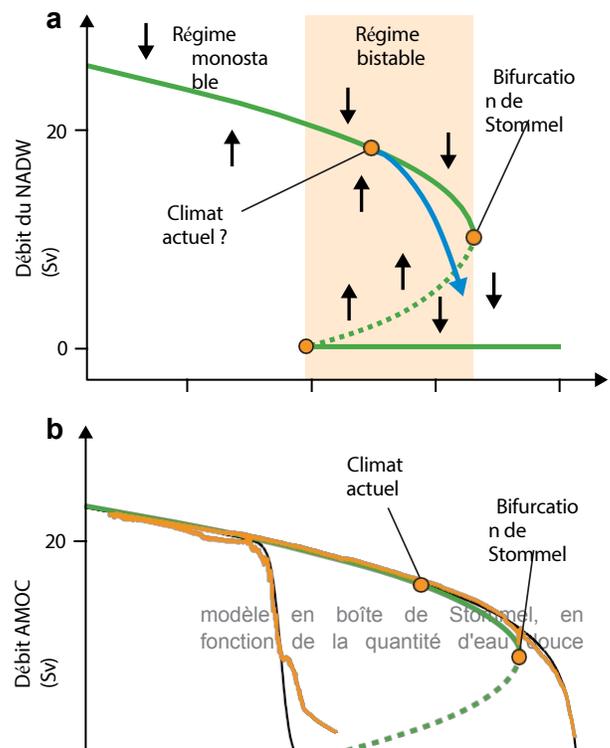


FIGURE 2 (ci-dessus). "Le système climatique de la Terre fonctionne actuellement d'une manière bénéfique pour l'Europe du Nord", a écrit feu Wally Broecker (Broecker, 1987). Cette carte montre à quoi ressemblerait le monde sans l'AMOC. Presque tout l'hémisphère nord serait plus froid, en particulier l'Islande, la Scandinavie et la Grande-Bretagne. *Figure de R. van Westen, adaptée de van Westen et al. (2024)*

FIGURE 3 (à droite). (a) Diagramme de stabilité de l'AMOC dans le



entrant dans l'Atlantique Nord. Les lignes vertes pleines indiquent des états d'équilibre stables, les lignes vertes en pointillés des états d'équilibre instables. La courbe bleue montre une trajectoire quittant les lignes d'équilibre lors d'un changement climatique rapide. *D'après Rahmstorf (2002)* (b) Ici, la ligne orange trace les équilibres de l'AMOC dans un scénario de changement climatique de trois ans. modèle de circulation océanique globale dimensionnelle. La ligne noire est la même

L'expérience de traçage réalisée avec le modèle de la boîte. Les lignes orange et noire supérieures sont tracées de gauche à droite à partir de l'AMOC "on", les lignes inférieures de droite à gauche à partir de l'AMOC "off". *D'après Rahmstorf (1996)*

0
-0.1 0.0 0.1 0.2
Forçage de l'eau douce (Sv)

L'approche de suivi consistant à ajouter lentement de l'eau douce doit donc être appliquée.

Dans le régime monostable (à gauche du forçage d'eau douce nul dans la **figure 3**), un arrêt de l'AMOC peut toujours être forcé par un important ajout temporaire d'eau douce, mais l'AMOC se rétablira une fois le forçage terminé. Dans le régime bistable, le système peut se trouver en permanence dans l'un ou l'autre des deux états stables, avec l'AMOC "en marche" ou "à l'arrêt", en fonction des conditions initiales. Ainsi, le flux d'AMOC interrompu par un forçage temporaire ne se rétablira pas mais restera dans l'état stable "éteint". Les expériences menées avec un tel ajout temporaire d'eau douce montrent que de nombreux modèles climatiques, sinon la plupart, se trouvent dans le régime monostable et sont donc relativement éloignés du point de basculement. Cela ne signifie pas qu'ils n'ont pas ce point de basculement ou qu'ils n'ont pas de régime bistable ; cela montre simplement qu'ils ne sont pas dans ce régime pour leur clientèle actuelle (probablement à tort, voir la section "Peut-on faire confiance aux modèles climatiques" ci-dessous).

Le changement climatique peut éloigner l'AMOC de la ligne d'équilibre, en suivant à peu près la trajectoire bleue de la **figure 3a**, parce que le réchauffement climatique moderne est trop rapide pour que l'océan puisse s'adapter complètement. Après avoir franchi la ligne en pointillés, l'AMOC sera attiré vers l'état "éteint", même s'il n'est pas poussé davantage. Il est à noter que l'AMOC est d'autant plus vulnérable à un forçage plus rapide (Stocker et Schmittner, 1997). Cela signifie que les expériences très lentes de suivi de l'équilibre illustrées à la **figure 3b** sous-estiment la proximité du point de basculement de l'AMOC dans une situation de changement climatique rapide, comme c'est le cas aujourd'hui.

Le fait que ce point de basculement et le régime bistable soient réels, et pas seulement un arti- fact du modèle simple

de Stommel, a été confirmé dans de nombreux modèles de toute la gamme depuis l'article de Stommel de 1961, y compris des modèles sophistiqués de circulation océanique tridimensionnelle, des modèles du système terrestre de complexité intermédiaire et des modèles à part entière de la circulation océanique tridimensionnelle.

modèles climatiques couplés, par exemple le

a trouvé le régime bistable dans les 11 modèles participants (Rahmstorf et al., 2005), et je ne connais aucun modèle qui a été testé et qui n'avait pas cette propriété. Bien que ce type d'expérience ne puisse pas être réalisé avec des modèles simulant explicitement des tourbillons à méso-échelle dans l'océan, je ne m'attends pas à ce que cela fasse une grande différence, étant donné que la rétroaction de l'advection de sel fonctionne à une très grande échelle.

Un deuxième type de point de basculement peut également affecter l'AMOC. Une partie importante du processus d'enfoncement dans l'Atlantique Nord (appelé "formation des eaux profondes") est le mélange vertical profond (convection) lorsque la colonne d'eau devient verticalement instable, en raison de la présence d'eau plus dense au-dessus d'eau moins dense. L'océanographe suédois Pierre Welander a montré en 1982 que la convection pouvait également être désactivée comme un interrupteur, toujours en raison de l'effet déstabilisant de la salinité (Welander, 1982). Dans les régions de haute latitude, l'océan est typiquement

L'eau douce provient de la pluie à la surface, de sorte que lorsque la convection s'arrête suffisamment longtemps, l'eau douce peut s'accumuler et former une couche superficielle de faible densité. Il devient alors de plus en plus difficile de relancer la convection et, à un moment donné, elle s'arrête définitivement. Dans des travaux ultérieurs, nous avons montré comment cela fonctionne même si la

Modèle communautaire du système terrestre (CESM) (van Westen et al., 2024). Un premier modèle



les mers nordiques. Dans ce
FIGURE 4. Les flux de surface actuels (lignes pleines) et les flux profonds (lignes pointillées) sont représentés pour l'Atlantique Nord et les mers nordiques. *Figure modifiée d'après R. Curry et C. Mauritzen © Woods Hole Oceanographic Institution*

La chaleur de la colonne d'eau en mélangeant des eaux plus chaudes jusqu'à la surface, où la chaleur est perdue dans l'atmosphère) a été plafonnée de cette manière, moins de chaleur est perdue à travers la surface de la mer, et toute la colonne d'eau devient moins dense. Cela ralentit l'AMOC, qui, après tout, est entraînée par les eaux froides à forte densité qui poussent vers le sud depuis les hautes latitudes. Ainsi, un arrêt de la convection peut contribuer à déclencher un arrêt de l'AMOC. Et comme la convection est un processus à petite échelle, elle n'est pas bien prise en compte dans la plupart des modèles actuels (Jackson et al., 2023), ce qui ajoute une couche d'incertitude sur l'avenir.

CHANGEMENTS DRASTIQUES DANS L'HISTOIRE DE L'AMOC

Sur la base de cette compréhension des mécanismes d'instabilité de l'AMOC, nous pouvons examiner certains changements climatiques spectaculaires qui se sont produits dans un passé récent - "récent", c'est-à-dire, du point de vue du paléoclimat, au cours des 100 000 dernières années.

En 1987, Wally Broecker a publié dans la revue *Nature* un article désormais célèbre intitulé "Unpleasant surprises in the green house" (Broecker, 1987). Dans cet article, il analyse des données provenant de carottes de sédiments de haute mer et de trous forés dans la calotte glaciaire du Groenland, notant que ces données révèlent que "le climat a changé fréquemment et par grands sauts" plutôt que progressivement et sans à-coups. Compte tenu des schémas régionaux de ces changements, il a désigné l'AMOC (appelé à l'époque "tapis roulant de

En libérant des gaz à effet de serre, "nous jouons à la roulette russe avec le climat [et] personne ne sait ce qui se trouve dans la chambre active du canon".

Au cours des décennies qui ont suivi, nous avons pu distinguer deux types d'événements climatiques abrupts qui se sont produits à plusieurs reprises au cours de la dernière période glaciaire, centrés sur l'Atlantique Nord mais ayant des répercussions mondiales (Rahmstorf, 2002).

Le premier type est celui des événements Dansgaard-Oeschger (DO), du nom de Willy Dansgaard, chercheur danois spécialisé dans les carottes de glace, et de son collègue suisse Hans Oeschger. Plus de 20 événements se manifestent par des pics de réchauffement de 10° à 15°C en l'espace d'une ou deux décennies dans les données des carottes de glace du Groenland (Dansgaard et al., 1982). Ils peuvent s'expliquer par des démarrages soudains de la convection océanique dans les mers nordiques, alors que la convection de l'âge glaciaire ne se produisait principalement que dans l'Atlantique ouvert au sud de l'Islande (**figure 5**). La configuration de la circulation océanique chaude qui a atteint l'extrême nord n'était apparemment pas stable dans les conditions de l'âge glaciaire : elle s'est progressivement affaiblie, jusqu'à ce qu'après quelques centaines d'années, la convection et l'événement chaud se terminent à nouveau. Il s'agit donc d'un exemple de basculement convectif tel que discuté ci-dessus, avec la convection des mers nordiques qui s'allume et s'éteint.

Le deuxième type est celui des

La glace de l'inlandsis laurentidien, qui recouvrait alors l'Amérique du Nord, était épaisse. Ces armadas d'icebergs ont dérivé sur l'Atlantique, laissant derrière elles des couches révélatrices de débris de glace sur le fond de l'océan et ajoutant de l'eau de fonte fraîche à la surface de l'océan. Cela a entraîné des changements climatiques encore plus spectaculaires, liés à une rupture complète de l'AMOC. Une telle quantité de glace a pénétré dans l'océan que le niveau de la mer s'est élevé de plusieurs mètres (Hemming, 2004). La preuve que cette quantité d'eau douce entrant dans l'Atlantique Nord a mis fin à l'AMOC se trouve dans le fait que l'Antarctique s'est réchauffé alors que l'hémisphère Nord s'est refroidi (Blunier et al., 1998), ce qui indique que l'énorme transport de chaleur de l'AMOC de l'extrême sud vers l'extrême nord en passant par l'équateur s'est essentiellement arrêté.

Les événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich, bien qu'importants dans l'Atlantique Nord, ont eu des répercussions majeures sur le climat mondial, même loin de l'Atlantique, car ils ont affecté les ceintures de précipitations tropicales qui résultent du mouvement ascendant de l'air chaud au-dessus de l'équateur thermique". Pendant les événements chauds de Dansgaard-Oeschger, ces ceintures pluviométriques se sont déplacées vers le nord, entraînant des conditions chaudes et humides dans les tropiques du nord jusqu'à l'Asie. En revanche, lors des événements de Heinrich, les ceintures pluviométriques se sont déplacées vers le sud, entraînant une sécheresse catastrophique dans la mousson afro-asiatique (2011). Des déplacements des ceintures pluviométriques pourraient-ils nous attendre à

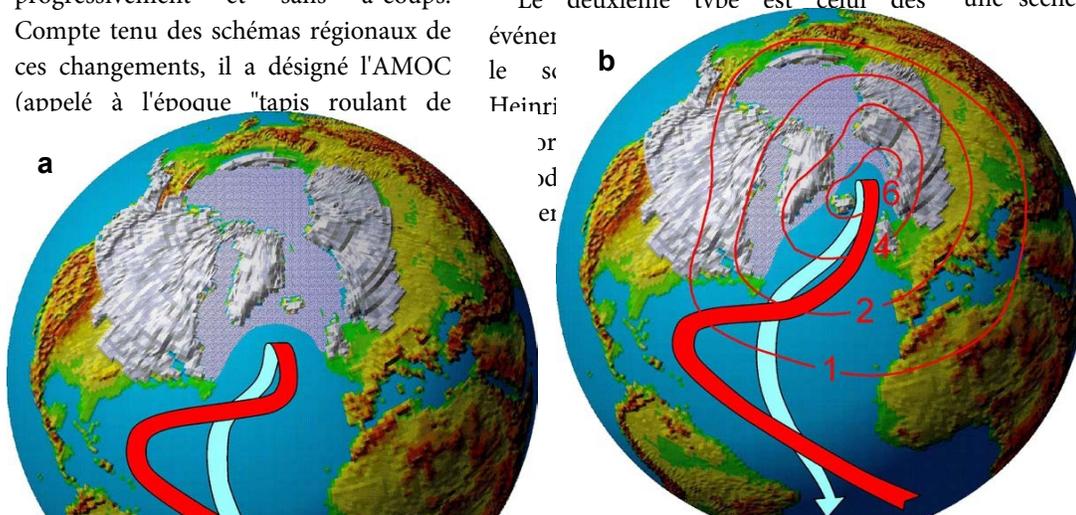


FIGURE 5 : L'AMOC au cours de la dernière période glaciaire. (a) L'état froid

prévalent (stadial). (b)
L'état plus chaud
(interstadial) pendant
les événements de
Dansgaard-Oeschger,
montrant le
changement de
température modélisé
par Ganopolski et
Rahmstorf (2002). La
résolution très grossière
de ce modèle sous-
estime l'effet de
réchauffement des
événements de
Dansgaard-Oeschger.

LE "COLD BLOB" : UN SIGNE INQUIÉTANT D'UN RALENTISSEMENT DE L'AMOC ?

Voyons comment l'AMOC réagit déjà au réchauffement planétaire en cours, qui a déjà poussé le climat de la Terre au-delà de l'enveloppe de l'Holocène stable (Osman et al., 2021) au cours duquel *Homo sapiens* a développé l'agriculture et a commencé à construire des villes.

Malheureusement, les données relatives à l'AMOC ne remontent qu'à quelques décennies et proviennent d'une poignée de croisières transatlantiques effectuées depuis les années 1950 et du réseau de stations RAPID-AMOC qui a recueilli des mesures continues de la salinité et de la vitesse des courants depuis la surface jusqu'au fond de la mer dans l'Atlantique à 26°N depuis 2004 (Smeed et al., 2020). Nous devons donc nous tourner vers des preuves indirectes. La pièce à conviction n° 1 est le "trou de réchauffement" ou le "blob froid" sur les cartes des températures globales observées.

changement de température (figure 6). Alors que l'ensemble du globe s'est réchauffé, l'Atlantique Nord subpolaire a résisté et s'est même refroidi. C'est précisément dans cette région que l'AMOC fournit une grande partie de sa chaleur et c'est précisément dans cette région que les modèles climatiques prévoient depuis longtemps un refroidissement dû au ralentissement de l'AMOC.

Une étude fondamentale de Dima et Lohmann (2010) a analysé les tendances mondiales des changements de température à la surface de la mer depuis le dix-neuvième siècle et a conclu que "le transporteur mondial s'affaiblit depuis la fin des années 1930 et qu'il n'y a pas eu de changement de température à la surface de la mer depuis le dix-neuvième siècle".

la cellule de retournement de l'Atlantique Nord a subi un changement abrupt vers 1970". Deux ans plus tard, un groupe néerlandais, analysant un ensemble de résultats de modèles, a confirmé qu'un ralentissement de l'AMOC était à l'origine du refroidissement de l'Atlantique Nord et a baptisé cette caractéristique le "trou de réchauffement" (Drijfhout et al., 2012). En 2015, je me suis associé au climatologue américain Michael Mann et à d'autres collègues pour utiliser la reconstruction paléoclimatique par proxy de Mann des températures de surface afin de suggérer que le ralentissement moderne de l'AMOC est probablement unique au moins pour le dernier millénaire (Rahmstorf et al., 2015). L'expression "cold blob" est née d'une citation de Mann dans un article du *Washington Post* sur notre étude (Mooney, 2015), et elle est depuis restée dans les mémoires.

Théoriquement, le blob froid aurait également pu résulter d'une augmentation de la chaleur nette.

à la surface de l'océan (He et al., 2022). En ce qui concerne la variabilité à court terme d'une année à l'autre, on s'attend à ce que les conditions météorologiques jouent un rôle dominant dans la modification de la température de surface de la mer - en particulier en été, lorsque la couche de mélange de surface est mince et que son inertie thermique est faible (c'est pourquoi, dans les études ultérieures, nous nous concentrons sur la période allant de novembre à mai). Les données de réanalyse basées sur les observations montrent cependant que depuis le milieu du XXe siècle, la perte nette de chaleur à travers la surface de l'océan dans la région du blob froid a *diminué*, et non augmenté - exactement ce à quoi on s'attendrait lorsque l'océan apporte moins de chaleur dans cette région, et donc moins à l'atmosphère (figure 7). En outre, l'analyse des modèles climatiques, dans lesquels les changements de l'AMOC sont connus, montre que la force de l'AMOC est en étroite corrélation avec la température de la bulle froide.

Réchauffement entre 1850-1900 et 2011-2021

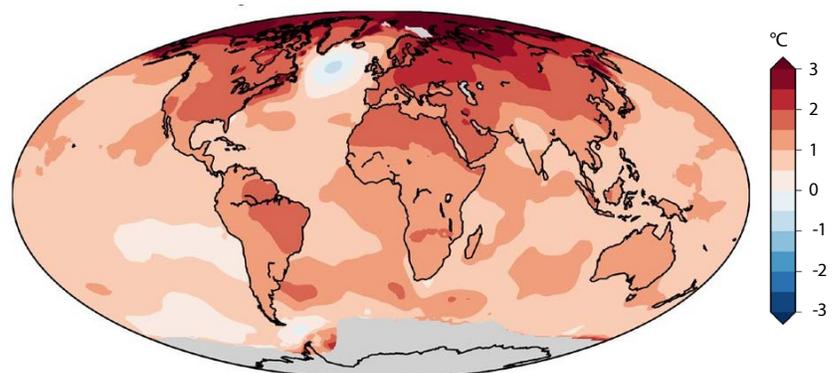
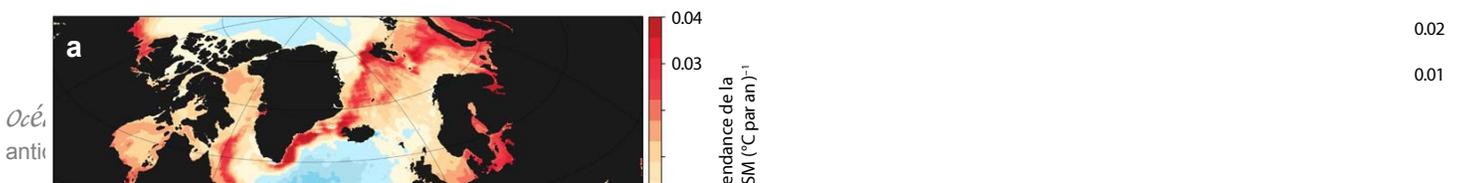


FIGURE 6 : Carte des changements observés de la température de l'air près de la surface depuis la fin du XIXe siècle. Les zones grises indiquent un manque de données. Crédit photo : Zeke Hausfather, Berkeley Earth



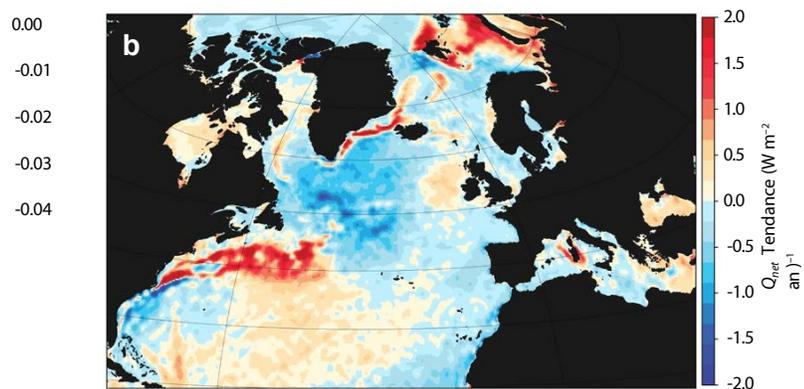


FIGURE 7. L’empreinte du ralentissement de l’AMOC dans les données de réanalyse basées sur des observations de 1940 à 2022. (a) Tendances de la température de surface de la mer (SST).

(b) Tendance de la perte nette de chaleur de la surface de l’océan (sensible, latente et radiative). Les tendances du flux de chaleur vont dans la direction opposée à celle de la cause des tendances de la TSM. *D’après Jendrkowiak (2024)*

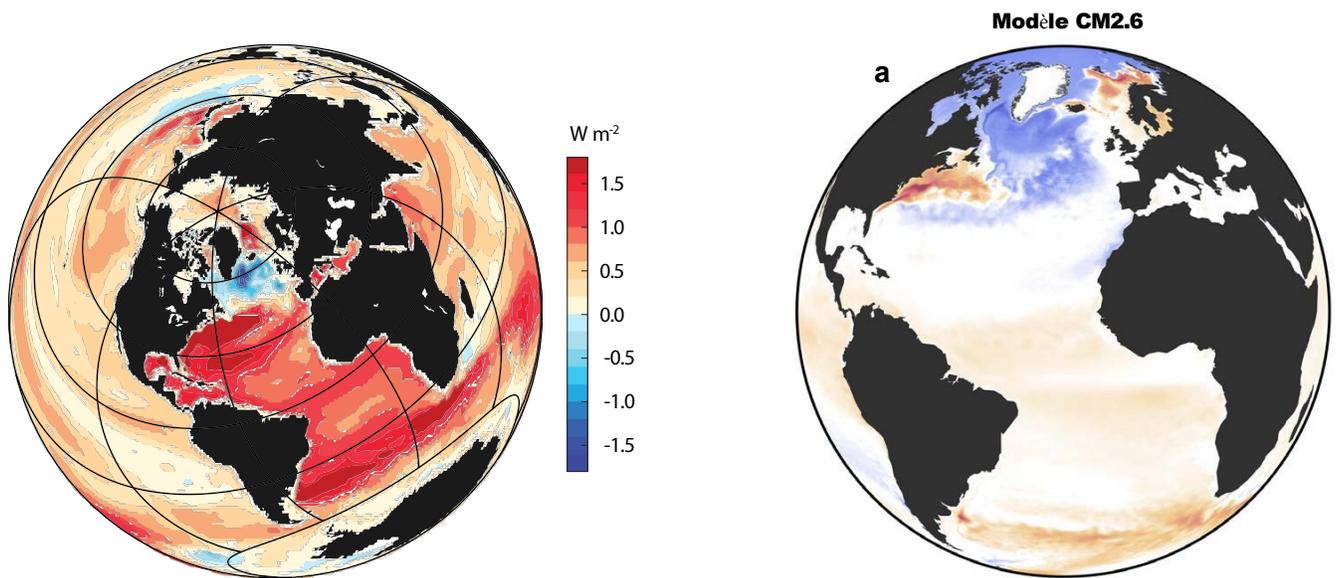


FIGURE 8. Tendence du contenu thermique de l'océan dans les 2 000 m supérieurs, 1958-2023. Données de l'IAP. *Crédit image : Lijing Cheng*

(Caesar et al., 2018). Ce résultat confirme que sur des échelles de temps plus longues, l'AMOC est le facteur dominant, ce qui permet de conclure que le blob froid correspond jusqu'à présent à un affaiblissement d'environ 15 % de l'AMOC.

Le blob froid n'est pas seulement un phénomène de surface ; il est également clairement visible (**figure 8**) dans la tendence du contenu thermique de l'océan dans les 2 000 m supérieurs (Cheng et al., 2022).

Mais en dehors du blob froid, le ralentissement de l'AMOC a un autre effet révélateur.

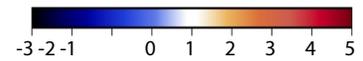
UN GULF STREAM EN MOUVEMENT

La dynamique des fluides sur un globe en rotation comme la Terre a des effets particuliers qui ne sont pas intuitifs. Ils résultent du fait que la force de Coriolis change avec la latitude. En 2007 et 2008, deux études menées par Rong Zhang, chercheur sur l'AMOC, ont démontré comment une loi fondamentale de la physique, la conservation de la quantité de mouvement angulaire, agissant au point où le flux AMOC du sud profond passe sous le Gulf Stream, fait que le Gulf Stream se rapproche de la côte lorsque l'AMOC s'affaiblit (Zhang et Vallis, 2007 ; Zhang, 2008). Ses études décrivent une "empreinte" de l'affaiblissement de l'AMOC qui comprend non seulement le blob froid mais aussi une anomalie de température de surface de la mer de signe opposé au large de la côte atlantique américaine au nord du cap Hatteras.

Caesar et al. (2018) ont comparé cette empreinte aux changements observés de la température de surface de la mer depuis la fin du XIXe siècle et ont constaté une forte concordance (voir **figure 9**). Les données d'observation sont beaucoup moins détaillées parce qu'elles reposent sur des mesures relativement éparpillées prises par les navires, mais les données satellitaires sont plus détaillées. Bien que les périodes de temps pour les données observées et les données satellitaires soient différentes, les tendances sont divisées par l'empreinte globale de la température de surface de la mer.

FIGURE 9. Dans ces cartes des tendances de la température de surface de la mer (TSM) divisées par leur tendance moyenne mondiale, le blanc signifie la même tendance que la moyenne mondiale. (a) Résultat d'une expérience de doublement du CO₂ avec le modèle climatique CM2.6 également présenté sur la page de titre de cet article, (b) montre la tendance observée sur 1870-2016, et (c) représente les données du satellite Copernicus collectées entre 1993 et 2021. (a) et (b) de Caesar et al.

(2018). (c) Avec l'aimable autorisation de Ruijian Gou
TSM



Tendance locale de la TSM/Tendance mondiale de la

La variabilité aléatoire de la température moyenne est plus importante que le changement de température moyenne pour les rendre à peu près comparables en termes de magnitude. Ainsi, pour la période relativement courte du satellite, la variabilité aléatoire est beaucoup plus forte que le signal ("bruit"), et le rapport signal/bruit diminue de haut en bas dans les trois images. Malgré les différences dans les autres variabilités, l'empreinte digitale du déclin de l'AMOC est très claire dans les trois tracés de **la figure 9**.

Par ailleurs, les trois diagrammes montrent une zone de réchauffement dans l'Arctique au large de la Norvège ; dans le modèle, cela est dû à l'augmentation du transport de chaleur océanique de l'Atlantique vers l'océan Arctique (Fiedler, 2020). Ce flux peut ne pas être lié à l'AMOC, ou peut être anti-corrélé à l'AMOC et donc constituer une troisième partie de son empreinte digitale.

Le fort réchauffement au large de la côte atlantique nord-américaine n'est pas non plus causé par les flux de chaleur de surface, car les données de réanalyse montrent que le flux de chaleur de surface a évolué dans la direction opposée, vers une augmentation de la perte de chaleur (**figure 7**). En outre, la génération actuelle de modèles climatiques (CMIP6) indique une corrélation claire entre la force de l'AMOC et cette empreinte digitale des températures de surface de la mer, y compris la partie froide et la partie chaude (Latif et al., 2022).

En outre, une étude récente utilisant les données d'observation tridimensionnelles de l'océan recueillies par les flotteurs-profileurs Argo (<https://argo.ucsd.edu/>) montre que le Gulf Stream s'est déplacé d'environ 10 km plus près des côtes depuis le début de ce siècle (Todd et Ren, 2023).

Grâce au tableau RAPID, nous savons que le

L'AMOC s'est en effet affaiblie au cours de cette période de temps. En outre, il y a eu un "affaiblissement robuste du Gulf Stream

ainsi que la fonte de la glace de mer et de la calotte glaciaire du Groenland, plus l'effet des changements de la circulation océanique qui amènent des eaux subtropicales moins salées vers le nord. Le bassin d'Islande enregistre la salinité la plus faible en 120 ans de mesures (Holliday et al., 2020).

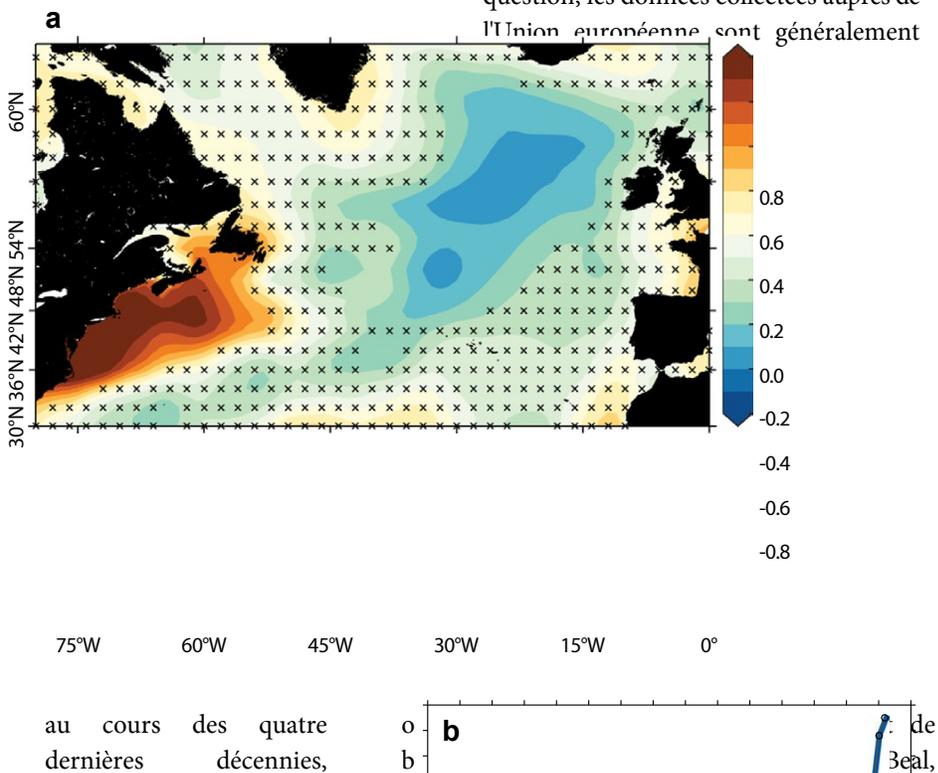
Dans le même temps, la salinité augmente dans l'Atlantique Sud subtropical, qui est considéré comme une empreinte AMOC moins affectée par les variations à court terme que l'empreinte de la température de l'Atlantique Nord ; cela suggère une accélération du ralentissement de l'AMOC depuis les années 1980 (Zhu et al., 2023).

L'analyse de la densité de l'eau de mer dans les 1 000 m supérieurs de la région du gyre subpolaire, qui est en étroite corrélation avec l'AMOC et montre un déclin au cours des 70 dernières années, apporte encore d'autres preuves. Ce déclin implique un affaiblissement de l'AMOC d'environ 13 % au cours de cette période (Chafik et al., 2022), ce qui est cohérent avec l'affaiblissement de 15 % suggéré par les données sur les bulles froides.

D'AUTRES LEÇONS TIRÉES DU PALÉOCLIMAT

Pour comprendre les conditions qui prévalaient avant le début des mesures régulières de la température, nous devons nous tourner vers les données indirectes : les traces des changements climatiques passés laissées dans les archives qui s'accumulent lentement, telles que les nappes glaciaires ou les sédiments du plancher océanique. Ces données nous permettent de reconstituer les températures passées de la surface de la mer et d'autres paramètres. Par exemple, le rapport entre les isotopes de l'oxygène trouvés dans les squelettes microscopiques qui constituent une grande partie des sédiments du fond marin fournit un enregistrement des températures passées de l'eau de surface, et la taille des grains de sédiments sur le fond océanique révèle la vitesse des courants au-dessus de celui-ci. Caesar et al. (2021) ont rassemblé un certain nombre de reconstructions publiées du flux passé de l'AMOC et ont conclu que l'AMOC est actuellement à son niveau le plus faible du dernier millénaire (**figure 11**).

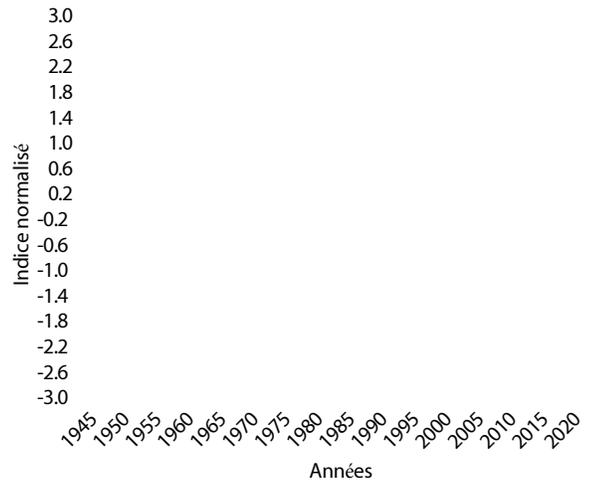
Bien que la validité des données indirectes puisse toujours être remise en question, les données collectées auprès de l'Union européenne sont généralement



2023), qui, même s'il n'est pas nécessairement lié à un affaiblissement de l'AMOC, est au moins cohérent avec celui-ci.

Les changements de salinité constituent une preuve supplémentaire du ralentissement de l'AMOC. L'Atlantique subpolaire nord-est se rafraîchit (**figure 10**), probablement sous l'effet conjugué d'un apport accru d'eau douce provenant des précipitations et des cours d'eau

FIGURE 10. Le "fresh blob" dans le nord-est de l'Atlantique Nord, avec une anomalie saline correspondante le long de la côte nord-américaine et l'évolution temporelle associée. Le bleu indique une salinité anormalement faible et le brun une salinité élevée. Comparez l'empreinte de la température de surface de la mer dans la figure 9. *Crédit image : N. Penny Holliday, © National Oceanography Centre, 2020, CC-BY 4.0, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>*



différentes régions analysées par différentes équipes de recherche utilisant des méthodes très différentes. Pour les séries de données de substitution qui s'étendent sur les dernières décennies, la concordance entre les reconstructions de l'AMOC basées sur les observations et les modèles est bonne (Caesar et al., 2022).

Compte tenu des nombreuses sources de données indépendantes, il existe des preuves accablantes d'un affaiblissement à long terme de l'AMOC depuis le début ou le milieu du vingtième siècle. Il convient de noter que l'AMOC présente une variabilité décennale importante en plus de son déclin à long terme, ce qui fait qu'il est essentiel d'être clair sur la période exacte lorsque l'on discute des changements de l'AMOC.

L'affaiblissement à long terme de l'AMOC est-il d'origine humaine ? De multiples lignes d'évi-

Les modèles climatiques prédisent depuis longtemps son déclin en réponse au réchauffement de la planète. Tout d'abord, les modèles climatiques prédisent depuis longtemps son déclin en réponse au réchauffement de la planète, et la physique qui sous-tend ces prédictions est comprise. Au moins deux études analysant les modèles climatiques et les observations les plus récents ont montré "que le récent trou de réchauffement de l'Atlantique Nord est d'origine anthropique" et qu'il est dû à une réduction du transfert de chaleur océanique vers le nord liée aux émissions de gaz à effet de serre (Chemke et al., 2020 ; Qasmi, 2023). En outre, les données paléoclimatiques présentées dans la **figure 11** indiquent également clairement que les activités humaines en sont la cause, dans la mesure où l'affaiblissement de l'AMOC coïncide avec la période de réchauffement planétaire moderne sans précédent.

PEUT-ON FAIRE CONFIANCE AUX MODÈLES CLIMATIQUES ?

Les modèles climatiques prévoient depuis longtemps un ralentissement significatif de l'AMOC en réponse au réchauffement de la planète, y compris un blob froid correspondant (voir la **figure 12** pour une version récente). En fait, j'ai écrit deux commentaires pour *Nature* sur ce sujet dans les années 1990 (Rahmstorf, 1997, 1999), et à l'époque comme aujourd'hui, l'ampleur de l'affaiblissement prévu différait grandement d'un modèle à l'autre. Le dernier rapport du GIEC, le sixième, a révélé que, même dans le cas d'un scénario de faibles émissions, l'AMOC s'affaiblira de 4 % à 46 % d'ici à 2100, selon le modèle. Dans le scénario de fortes émissions, la réduction se situe entre 17 % et 55 % (GIEC, 2021). Le rapport du GIEC conclut également : "Bien que l'on soit moyennement convaincu que le déclin prévu de l'AMOC n'entraînera pas un effondrement brutal avant 2100, un tel effondrement pourrait être déclenché par un afflux inattendu d'eau de fonte en provenance de l'inlandsis groenlandais."

Cela nous amène à une question importante : **Pouvons-nous faire confiance aux modèles climatiques sur ce point ?** D'une manière générale, les modèles climatiques ont fait un excellent travail de prévision des températures moyennes mondiales. Même des modèles assez simples des années 1980 ont prédit correctement le réchauffement climatique sur le plan quantitatif, y compris les modèles gérés par Exxon (Supran et al...),

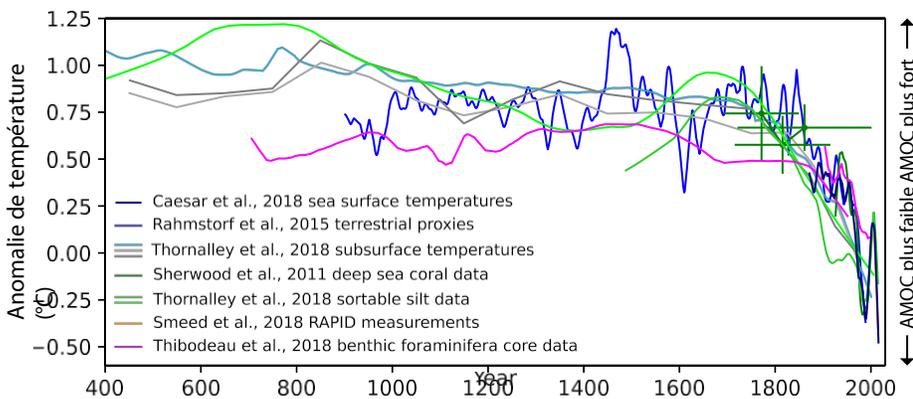


FIGURE 11. Force de l'AMOC au cours des 1 600 dernières années, telle que reconstituée à partir de différents ensembles de données paléoclimatiques. D'après Caesar et al. (2021) L'axe vertical montre l'anomalie de température dans la région du "cold blob" d'après Caesar et al. (2018) ; les autres données sont mises à l'échelle en fonction de cette anomalie.

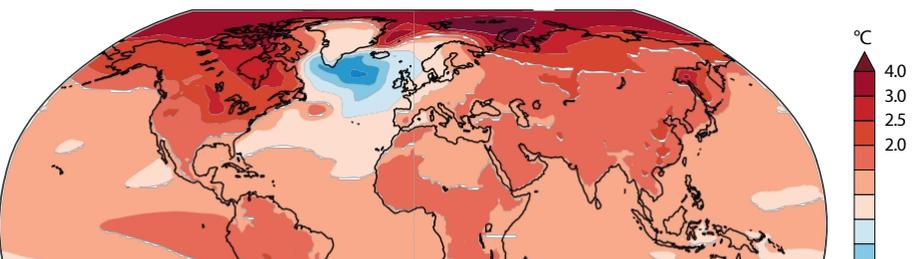


FIGURE 12. Cette figure du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

1.5
1.0
0.0
-1.0
-1.5
-2.0
-2.5
-3.0
-4.0

(GIEC) illustre l'évolution de la température mondiale d'ici à 2100 pour un scénario à faibles émissions (SSP1-2.6) dans des modèles à fort réchauffement (GIEC, 2021, figure 1 de l'encadré TS.3).

2023). Mais c'est relativement facile, car cela dépend simplement de l'équilibre énergétique de la Terre.

Les changements dans la circulation océanique thermohaline sont beaucoup plus difficiles à prévoir, car ils dépendent de subtiles différences de température et de salinité dans l'océan, en trois dimensions. Les modèles n'ont pas réussi à reproduire les changements passés de l'AMOC (McCarthy et Caesar, 2023). Le dernier rapport du GIEC montre que les modèles climatiques actuels ne génèrent même pas, en moyenne, le blob froid observé (alors que de nombreux modèles antérieurs le faisaient ; voir la [figure 13](#)).

En fait, de nombreuses recherches suggèrent que l'AMOC est généralement trop stable dans les modèles climatiques. L'une des raisons pourrait être ce que le GIEC a appelé le "réglage vers la stabilité". Si un modèle a un AMOC trop instable, il s'effondre déjà pour le climat actuel,

Comme cela s'est produit dans un certain nombre de modèles (par exemple, Manabe et Stouffer, 1988), le modèle sera "réparé" (c'est-à-dire amélioré pour mieux refléter la réalité). Mais si l'AMOC est trop stable, ce modèle ne semblera pas erroné car le climat actuel est correctement reproduit.

Un autre problème est même évoqué dans la superproduction hollywoodienne de 2004 *Le jour d'après*, où le scientifique Jack Hall (Dennis Quaid) déclare : "Personne n'a pris en compte la quantité d'eau douce déversée dans l'océan à cause de la fonte des glaces polaires ! Je pense que nous avons atteint un point critique en matière de désalinisation". Jusqu'à présent, la plupart des modèles climatiques n'ont pas intégré un inlandsis groenlandais interactif (qui a son propre point de basculement ; par exemple, Robinson et al., 2012) et négligent l'apport croissant d'eau de fonte.

Ce "point critique de désalinisation" est, bien entendu, le point de basculement de Stommel évoqué plus haut, et déterminer la distance qui nous sépare de ce point est un problème très difficile à résoudre.

OÙ SE SITUE LE POINT DE BASCULEMENT ?

Une façon de trouver le point de basculement est de réaliser une expérience comme celle illustrée à la [figure 3](#). Mais cette méthode est très coûteuse et, dans les cas où elle a été tentée, la distance par rapport au point de basculement est très différente. En 1996, j'ai proposé que la question de savoir si l'AMOC

Le transport d'eau douce hors ou dans l'Atlantique à la latitude de l'Afrique du Sud détermine s'il se trouve dans le régime bistable indiqué dans la [figure 3](#), ou plus loin du point de basculement vers la gauche (Rahmstorf, 1996). D'autres études ont soutenu cette idée, et les données d'observation suggèrent que l'AMOC réelle se trouve dans le régime bistable, c'est-à-dire relativement proche du point critique. En revanche, dans la plupart des modèles, l'AMOC se trouve dans le régime monostable, loin du point de basculement (voir la revue de Weijer et al., 2019). La raison en est des biais apparemment subtils dans la distribution de la salinité de l'Atlantique dans les modèles. Cette distribution de la salinité peut être poussée vers des valeurs de salinité observées plus réalistes, plutôt que de laisser la salinité évoluer librement sous l'influence des précipitations, de l'évaporation et des courants océaniques calculés. Lorsque cela a été fait dans un modèle climatique, l'AMOC s'est effondré dans un scénario de doublement de la concentration de CO₂, alors qu'il est resté stable dans le modèle original non ajusté (Liu et al., 2017).

Compte tenu des limites des modèles climatiques actuels, certains chercheurs se sont tournés vers des méthodes empruntées à la physique non linéaire pour rechercher dans les données d'observation des signaux d'alerte précoce annonçant l'approche d'un point de basculement. Ces méthodes sont basées sur le fait que dans un système "bruyant" comme le climat, des paramètres tels que la force de l'AMOC "s'agitent" aléatoirement un peu sous l'effet de la pression atmosphérique.

l'influence des variations stochastiques (aléatoires), telles que les conditions météorologiques. Mais lorsque le système est proche d'un point de basculement, les forces qui le poussent à revenir à son équilibre stable s'affaiblissent progressivement, de sorte que le système met plus de temps à revenir. C'est ce qu'on appelle le "ralentissement critique".

Plusieurs études ont analysé les données AMOC sous cet angle. Boers (2021) a analysé quatre séries de données de température et quatre séries de données de salinité qui ont été liées à la force de l'AMOC et a conclu qu'il y avait "des preuves solides que l'AMOC s'approche effectivement d'une transition critique induite par une bifurcation". Dans une autre étude, Michel et al. (2022) ont utilisé 312 séries de données paléoclimatiques de substitution remontant à un millénaire et ont trouvé une "estimation robuste, car basée sur des observations suffisamment longues, selon laquelle la variabilité multidécennale de l'Atlantique pourrait maintenant s'approcher d'un point de basculement après lequel le système des courants de l'Atlantique pourrait subir une transition critique". En 2023, des chercheurs danois ont fait les gros titres avec leur "avertissement d'un effondrement prochain de l'AMOC", débutant à tout moment entre 2025 et 2095 et très probablement vers le milieu de ce siècle (Ditlevsen et Ditlevsen, 2023). Une étude récente du groupe néerlandais de l'université d'Utrecht - l'un des principaux groupes de recherche au monde sur la stabilité de l'AMOC - a introduit un "nouveau signal d'alerte précoce basé sur la physique [qui]".

Changement observé pour un réchauffement global de 1°C Changement simulé pour un réchauffement global de 1°C

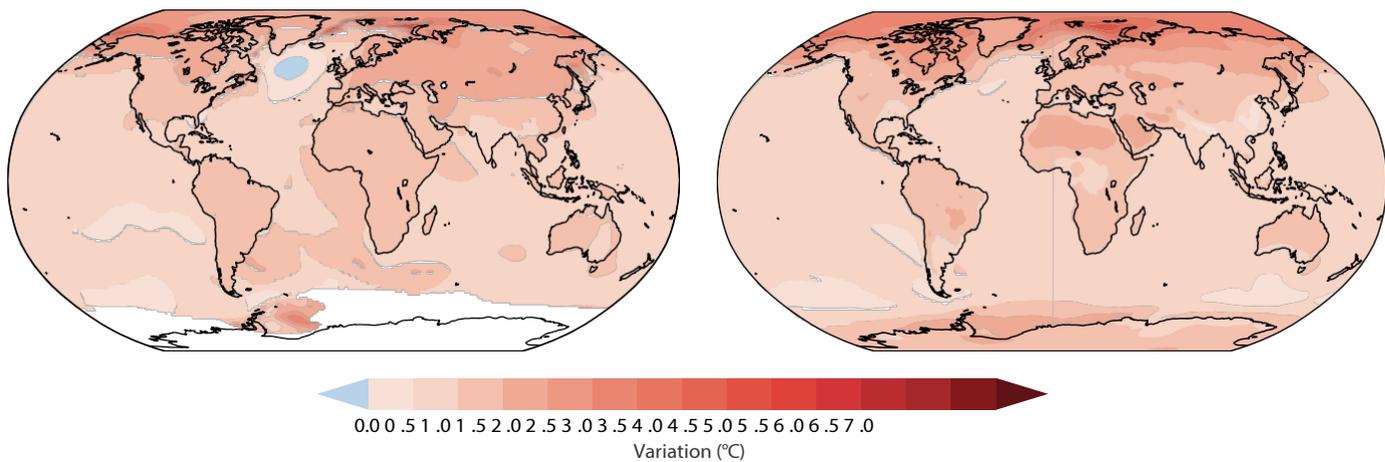


FIGURE 13. Comparaison de l'évolution de la température de surface moyenne annuelle observée et simulée pour un réchauffement global de 1°C (GIEC, 2021, figure SPM.5). En moyenne, les modèles ne reproduisent pas la bulle froide observée.

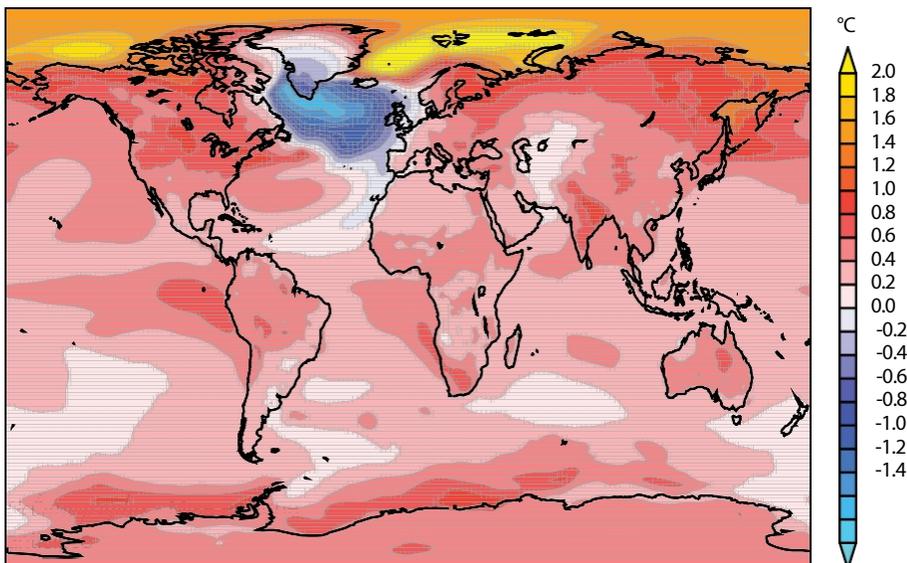
montre que l'AMOC est en train de basculer" (van Westen et al., 2024).

Toutes ces prédictions ont leurs limites - par exemple, les changements dans la variabilité pourraient avoir d'autres raisons que l'approche d'un point de basculement. Mais le fait que toutes ces études, utilisant des méthodes différentes, pointent dans la même direction, vers un risque beaucoup plus important et plus précoce que ce que nous pensions jusqu'à il y a quelques années, est une préoccupation majeure. Mon évaluation de ces études sur les signaux d'alerte précoce est que lorsqu'elles pourront fournir un avertissement raisonnablement fiable d'un basculement imminent de l'AMOC, il sera trop tard pour l'empêcher. Dans cette situation, la seule réaction politique responsable est de se laisser guider par le principe de précaution (c'est-à-dire la responsabilité de protéger le public lorsque l'enquête scientifique a révélé un risque plausible).

Dans une certaine mesure, le basculement peut même dépendre des caprices de la météo. Dans le modèle climatique de la NASA, dans 10 simulations utilisant le même scénario de réchauffement à effet de serre "moyen" (SSP2-4.5) avec un réchauffement global inférieur à 3°C, l'AMOC s'effondre dans deux simulations, mais se rétablit après un affaiblissement significatif dans huit simulations ; la différence est simplement une variabilité interne stochastique (Romanou et al., 2023). Cela fait également partie de la nature des points de basculement.

Outre l'arrêt complet de l'AMOC, il faut encore considérer le deuxième type de point de basculement, celui où la convection s'arrête dans une région. Ce phénomène se produit dans un nombre surprenant de modèles climatiques et n'a jusqu'à présent pas reçu l'attention publique qu'il mérite. Le premier cas documenté, celui du modèle britannique Hadley Centre, a été publié en 1999 (Wood et al., 1999). Dans la dernière génération de modèles (CMIP6), la convection du gyre subpolaire s'interrompt dans quatre des 35 modèles - et ces quatre modèles font partie du groupe des 11 meilleurs modèles pour ce qui est de la reproduction des fichiers de densité verticale dans le gyre subpolaire (Swingedouw et al., 2021). C'est le cas de 36% de ces modèles de haute qualité. Dans la génération précédente de modèles (CMIP5), ce chiffre était de 45 %. Qui plus est, ce phénomène se produit généralement dès l'année 2040 et pour les scénarios d'émissions modérés, même sans tenir compte de la fonte du Groenland. Ainsi, un effondrement de la convection dans le gyre subpolaire, entraînant un affaiblissement rapide de l'AMOC et un refroidissement régional brutal, doit être considéré comme un risque élevé nécessitant une attention urgente.

Qu'est-ce que cela signifie pour notre avenir ? Examinons d'abord les conséquences d'un ralentissement ou d'un effondrement de l'AMOC, puis discutons des implications.



QUELLE SERAIT LA GRAVITÉ DE LA SITUATION ?

Le blob froid actuel affecte déjà notre météo, mais pas de la manière attendue : un Atlantique Nord subpolaire froid est en corrélation avec la chaleur estivale en Europe (Duchez et al., 2016). Le refroidissement de la surface de la mer est suffisant pour influencer la distribution de la pression atmosphérique d'une manière qui favorise l'afflux d'air chaud du sud vers l'Europe. Par exemple, au cours de l'été 2015, l'Atlantique subpolaire a été le plus froid depuis le début des relevés au XIXe siècle, alors que l'Europe a connu une forte vague de chaleur. Des études ultérieures ont montré que les vagues de chaleur augmentent trois à quatre fois plus vite en Europe

que dans d'autres régions de l'hémisphère nord, en raison de changements dans le courant-jet qui pourraient bien être influencés par le blob froid (Rousi et al., 2022).

Plusieurs études montrent que si l'AMOC s'affaiblit, le niveau de la mer sur la côte nord-est américaine augmentera plus fortement (par exemple, Levermann et al., 2005 ; Yin et al., 2010). La force de Coriolis pousse l'eau en mouvement, en l'occurrence le Gulf Stream, vers la droite, loin de la côte américaine. Lorsque le Gulf Stream s'affaiblit, moins d'eau est déplacée vers le nord, ce qui entraîne une élévation du niveau de l'eau au large du Gulf Stream. Les modèles prévoient une élévation de 15 à 20 cm d'ici à 2100 pour ce seul effet, en plus des

autres causes de l'élévation des mers. L'érosion côtière, la fréquence des inondations nuisibles et l'étendue des dégâts causés par les ondes de tempête augmenteront considérablement.

Un effondrement de la convection dans la gyre subpolaire amplifierait considérablement ces problèmes. La **figure 14** montre le changement de température attendu dans ce cas. Ce n'est pas tant le changement absolu que les changements de contraste de température entre régions voisines - ici, l'océan froid par rapport aux masses terrestres chaudes adjacentes - qui modifieront considérablement la dynamique du temps, car les gradients de température déterminent l'activité météorologique d'une manière que nous ne pouvons pas prévoir dans le détail. Même ce changement océanique limité modifiera les conditions climatiques tropicales.

Les ceintures de précipitations, mais pas autant qu'un arrêt complet de l'AMOC.

FIGURE 14. Les changements de température dans la moyenne du modèle avant et après un effondrement de la convection dans la région du gyre subpolaire sont représentés ici. *D'après Swingedouw et al. (2021)*

Un arrêt complet de l'AMOC aurait des conséquences véritablement dévastatrices pour l'humanité et de nombreux écosystèmes marins et terrestres. La **figure 15** montre le modèle de Liu et al. (2017) après un doublement du CO₂, avec un effondrement de l'AMOC causé par cette augmentation du CO₂. Les températures de l'air froid s'étendent ensuite pour couvrir l'Islande, la Grande-Bretagne et la Scandinavie. Le contraste de température entre le nord et le sud de l'Europe augmente massivement de 4°C, avec probablement un impact majeur sur la météo, comme des tempêtes sans précédent.

La **figure 16** montre les changements de précipitations dans ce modèle. Comme nous l'avons vu dans les données paléoclimatiques concernant les événements de Heinrich, des changements majeurs de précipitations dans les tropiques entraîneraient probablement des problèmes de sécheresse dans les tropiques du nord de l'Amérique ainsi qu'en Asie. Les changements saisonniers seront encore plus importants que ces changements annuels moyens. D'autres simulations prévoient une augmentation significative des tempêtes hivernales en Europe et une "forte réduction du rendement des cultures et des pâturages" dans cette région (Jackson et al., 2015).

Le GIEC a résumé les impacts : "Si un effondrement de l'AMOC devait se produire, il provoquerait très probablement des changements brusques dans les régimes météorologiques régionaux et dans la qualité de l'eau.

cycle, comme un déplacement vers le sud de la

La ceinture de pluie tropicale, et pourrait entraîner un affaiblissement des moussons africaines et asiatiques, un renforcement des moussons de l'hémisphère sud, et un assèchement en Europe" (GIEC, 2021, TS p. 73). Parmi les autres conséquences, on peut citer une nouvelle élévation importante du niveau de la mer, en particulier le long de la côte atlantique américaine, une

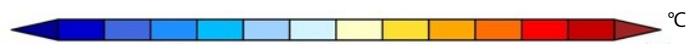
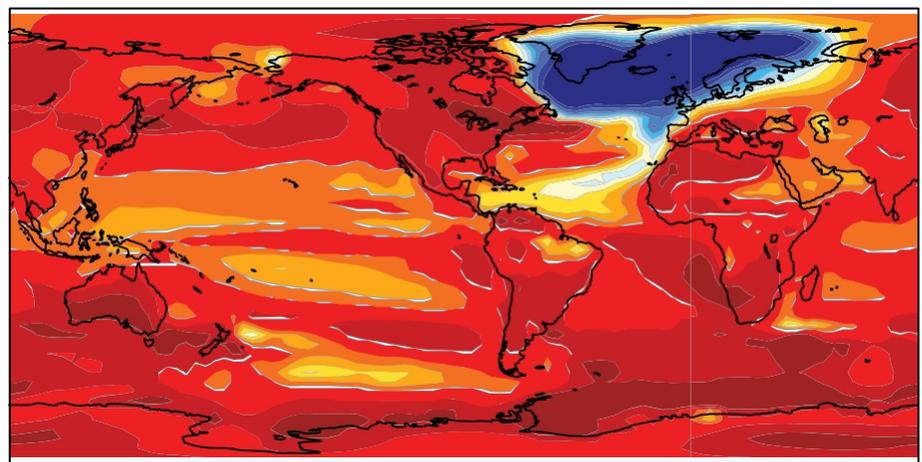
nous avertit qu'au-delà d'un réchauffement de 1,5°C, nous entrons dans le domaine du "risque élevé" en ce qui concerne les points de basculement climatiques (GIEC, 2023).

L'équivalent dans l'hémisphère sud de la formation d'eau profonde de l'Atlantique Nord est également menacé : la formation d'eau de fond de l'Antarctique. Une étude récente menée par des chercheurs australiens a conclu que l'afflux croissant d'eau de fonte autour de l'Antarctique devrait ralentir considérablement la circulation de retournement de l'Antarctique, avec un risque d'effondrement au cours de ce siècle.

(Q. Li et al., 2023). Cela ralentira la vitesse à laquelle l'océan absorbe le CO₂ (il s'en accumulera donc davantage dans l'atmosphère) et réduira l'approvisionnement en oxygène des grands fonds marins.

Un effondrement complet de l'AMOC serait une catastrophe massive à l'échelle de la planète. Nous voulons *vraiment* éviter que cela ne se produise.

En d'autres termes, nous parlons d'analyse des risques et de prévention des catastrophes. Il ne s'agit pas d'être sûr à 100 % ou même à 50 % que l'AMOC franchira son point de basculement au cours de ce siècle.



-2.4 -1.2 -0.6 0.0 0.6 1.2 2.4

diminution de l'absorption du dioxyde de carbone par les océans, une forte réduction de l'apport d'oxygène dans les profondeurs de l'océan et un effondrement probable de l'écosystème dans l'Atlantique Nord.

IMPLICATIONS : L'INCERTITUDE N'EST PAS NOTRE AMIE

Le risque d'une transition critique de l'AMOC est réel et très sérieux, même si nous ne pouvons pas prédire avec certitude quand et si cela se produira. Nous avons déjà laissé derrière nous le climat stable de l'Holocène dans lequel l'humanité a prospéré (Osman et al., 2021), et le dernier rapport du GIEC

FIGURE 15. Variation annuelle moyenne de la température de l'air près de la surface résultant d'un doublement du CO₂ et d'un effondrement de l'AMOC. Alors que la Terre est beaucoup plus chaude, la région de l'Atlantique Nord est devenue plus froide. En hiver, le refroidissement y est encore plus important. D'après Liu et al. (2017)

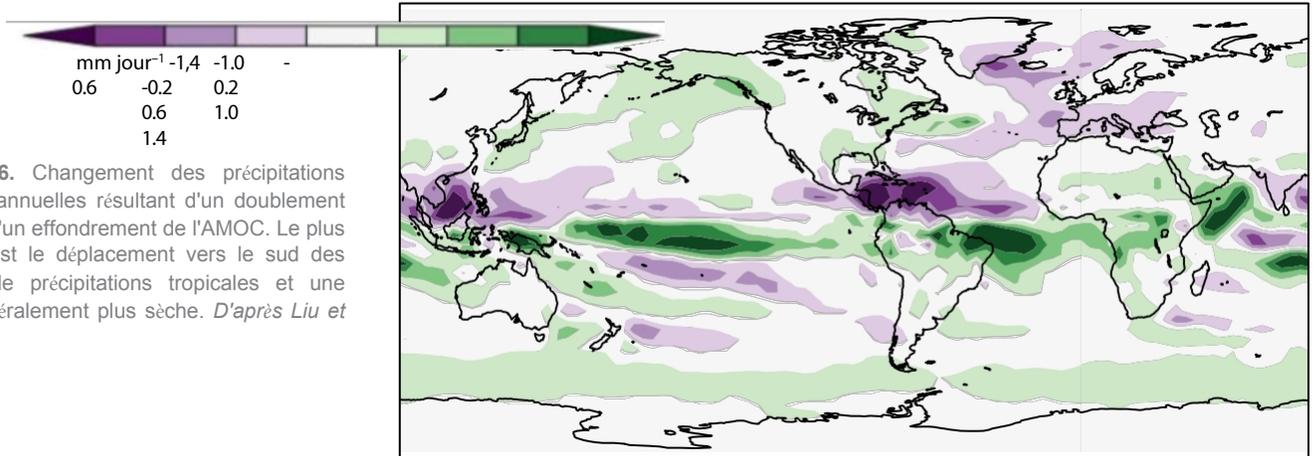


FIGURE 16. Changement des précipitations moyennes annuelles résultant d'un doublement du CO₂ et d'un effondrement de l'AMOC. Le plus inquiétant est le déplacement vers le sud des ceintures de précipitations tropicales et une Europe généralement plus sèche. D'après Liu et al.

Nous aimerions être sûrs à 100 % que cela ne se produira pas. Le fait que le GIEC n'ait qu'une "confiance moyenne" dans le fait qu'il ne se produira pas au cours de ce siècle est loin d'être rassurant, et les études dont il est question ici, qui ont été réalisées après le rapport 2021 du GIEC, font état d'un risque beaucoup plus important que ce que l'on pensait auparavant.

Le Global Tipping Points Report 2023 a été publié en décembre 2023. Il s'agit d'un travail de 500 pages réalisé par 200 chercheurs de 90 organisations dans 26 pays (Lenton et al., 2023). Son résumé se lit comme suit : "Les points de basculement néfastes dans le monde naturel représentent certaines des menaces les plus graves auxquelles l'humanité est confrontée. Leur déclenchement endommagera gravement les systèmes de survie de notre planète et menacera la stabilité de nos sociétés."

En ce qui concerne l'AMOC et les autres points de basculement climatiques, la seule mesure que nous puissions prendre pour minimiser le risque est d'abandonner progressivement l'utilisation des combustibles fossiles et de mettre un terme à la déforestation aussi rapidement que possible. Si nous parvenons à réduire à zéro nos émissions, le réchauffement de la planète s'arrêtera en quelques années, et plus tôt cela se produira, moins le risque de franchir des points de basculement dévastateurs sera grand. Cela permettrait également de minimiser les pertes, les dommages et les souffrances humaines liés aux effets "normaux" du réchauffement climatique (vagues de chaleur, inondations, sécheresses, mauvaises récoltes, incendies de forêt, élévation du niveau de la mer), qui se produisent déjà tout autour de nous, même en l'absence de points de basculement climatiques majeurs.

Comme le conclut un autre rapport sur les points de basculement climatiques publié en décembre 2022 par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) :

"Pourtant, les données scientifiques actuelles plaident sans équivoque en faveur d'une action climatique sans précédent, urgente et ambitieuse pour faire face aux risques de basculement du système climatique" (OCDE, 2022).

Il serait irresponsable, voire insensé, que les décideurs politiques, les chefs d'entreprise et même les électeurs continuent d'ignorer ces risques.

RÉFÉRENCES

- Blunier, T., J. Chappellaz, J. Schwander, A. Dällenbach, B. Stauffer, T.F. Stocker, D. Raynaud, J. Jouzel, H.B. Clausen, C.U. Hammer, et J.S. Johnsen. 1998. Asynchronie de l'Antarctique et de la
- Changement climatique au Groenland au cours de la dernière période glaciaire. *Nature* 394:739-743, <https://doi.org/10.1038/29447>.
- Boers, N. 2021. Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation. *Nature Climate Change* 11(8):680-688, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>.
- Broecker, W. 1987. Unpleasant surprises in the green-house ? *Nature* 328:123-126, <https://doi.org/10.1038/328123a0>.
- Caesar, L., S. Rahmstorf, A. Robinson, G. Feulner, et V. Saba. 2018. Observed fingerprint of a weak- ening Atlantic Ocean overturning circulation (Empreinte observée d'une circulation de retournement de l'océan Atlantique affaiblie). *Nature* 556(7700):191-196, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0006-5>.
- Caesar, L., G.D. McCarthy, D.J.R. Thorne, N. Cahill et S. Rahmstorf. 2021. Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience* 14:118-120, <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>.
- Caesar, L., G.D. McCarthy, D.J.R. Thorne, N. Cahill et S. Rahmstorf. 2022. Reply to : Atlantic circulation change still uncertain. *Nature Geoscience* 15:168-170, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00897-3>.
- Chafik, L., N.P. Holliday, S. Bacon, et T. Rossby. 2022. La mer d'Irminger est au centre de l'action pour la variabilité subpolaire de l'AMOC. *Geophysical Research Letters* 49(17), <https://doi.org/10.1029/2022GL099133>.
- Chemke, R., L. Zanna, et L.M. Polvani. 2020. Identifying a human signal in the North Atlantic warming hole (Identification d'un signal humain dans le trou de réchauffement de l'Atlantique Nord). *Nature Communications* 11(1), <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15285-x>.
- Cheng, L., G. Foster, Z. Hausfather, K.E. Trenberth et J. Abraham. 2022. Improved quantification of the rate of ocean warming. *Journal of Climate* 35(14):4,827-4,840, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0895.1>.
- Dansgaard, W., H.B. Clausen, N. Gundestrup, C.U. Hammer, S.F. Johnsen, P.M. Kristinsdottir, et N. Reeh. 1982. A new Greenland deep ice core. *Science* 218:1,273-1,277, <https://doi.org/10.1126/science.218.4579.1273>.
- Dijkstra, H.A., M.J. Molemaker, A. Van der Ploeg, et E.F.F. Botta. 1995. An efficient code to compute non-parallel steady flows and their linear stability. *Computers and Fluids* 24:415-434, [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00042-W](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00042-W).
- Dima, M., et G. Lohmann. 2010. Evidence for two distinct modes of large-scale ocean circulation changes over the last century. *Journal of Climate* 23(1):5-16, <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2867.1>.
- Ditlevsen, P., et S. Ditlevsen. 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature* 14:4254, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- Drijfhout, S., G.J. van Oldenborgh, et A. Cimatoribus. 2012. Le déclin de l'AMOC est-il à l'origine du réchauffement climatique ? Comment expliquer la présence d'un trou d'air au-dessus de l'Atlantique Nord dans les modèles de réchauffement observés et modélisés ? *Journal of Climate* 25(24):8,373-8,379, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00490.1>.
- Duchez, A., E. Frajka-Williams, S.A. Josey, D.G. Evans, J.P. Grist, R. Marsh, G.D. McCarthy, B. Sinha, D.I. Berry, et J.J.M. Hirschi. 2016. Drivers of exceptionally cold North Atlantic Ocean temperatures and their link to the 2015 European heat wave. *Environmental Research Letters* 11(7):074004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074004>.
- Ellis, H. 1751. Lettre du capitaine Ellis, F.R.S., au révérend Dr. Hales, F.R.S., datée du 7 janvier 1750 - 1751, au Cap Monte Africa, navire Earl of Halifax. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*

- Feulner, G., S. Rahmstorf, A. Levermann, et S. Volkwardt. 2013. On the origin of the surface air temperature difference between the hemispheres in Earth's present-day climate (Sur l'origine de la différence de température de l'air de surface entre les hémisphères dans le climat actuel de la Terre). *Journal of Climate* 26(18):7,136-7,150, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00636.1>.
- Fiedler, L. 2020. *Etude du transport de chaleur dans l'Atlantique Nord dans le modèle climatique global CM2.6*. Mémoire de licence, Université de Potsdam. Ganopolski, A., et S. Rahmstorf. 2002. Abrupt glacial en raison d'une résonance stochastique. *Physical Review Letters* 88:038501, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.038501>.
- He, C., A.C. Clement, M.A. Cane, L.N. Murphy, J.M. Klavans et T.M. Fenske. 2022. A North Atlantic warming hole without ocean circulation. *Geophysical Research Letters* 49(19), <https://doi.org/10.1029/2022GL100420>.
- Heinrich, H. 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research* 29:143-152, [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(88\)90057-9](https://doi.org/10.1016/0033-5894(88)90057-9).
- Hemming, S.R. 2004. Heinrich events : Massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Reviews of Geophysics* 42(1), <https://doi.org/10.1029/2003RG000128>.
- Holliday, N.P., M. Bersch, B. Bex, L. Chafik, S. Cunningham, C. Florindo-Lopez, H. Hatun, W. Johns, S.A. Josey, K.M.H. Larsen, et autres. 2020. Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic. *Nature Communications* 11(1):585, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14474-y>.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). 2021. *Changement climatique 2021 : Les bases de la science physique. Contribution du groupe de travail I au sixième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu et B. Zhou, eds, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, USA, 2 391 p., <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- GIEC. 2023. *Changement climatique 2023 : Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Équipe de rédaction principale, H. Lee et J. Romero, eds, IPCC, Genève, Suisse, 184 p., <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Jackson, L.C., R. Kahana, T. Graham, M.A. Ringer, T. Woollings, J.V. Mecking, et R.A. Wood. 2015. Global and European climate impacts of a slow-down of the AMOC in a high resolution GCM. *Climate Dynamics* 45(11-12):3,299-3,316, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2540-2>.
- Jackson, L.C., H.T. Hewitt, D. Bruciaferri, D. Calvert, T. Graham, C. Guivarch, M.B. Menary, A.L. New, M. Roberts et D. Storkey. 2023. Challenges simulating the AMOC in climate models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2262):20220187, <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0187>.
- Jendrkowiak, J. 2024. *Heat Budget Analysis over the North Atlantic*. Thèse de licence, Université de Potsdam.
- Kuhlbrodt, T., S. Titz, U. Feudel et S. Rahmstorf. 2001. A simple model of seasonal open ocean convection. Part II. Labrador Sea stability and stochastic forcing. *Ocean Dynamics* 52:36-49, <https://doi.org/10.1007/s10236-001-8175-3>.

- Latif, M., J. Sun, M. Visbeck et M. Hadi Bordbar. 2022. La variabilité naturelle a dominé la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique depuis 1900. *Nature Climate Change* 12:455-460, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01342-4>.
- Lenton, T.M., D.I. Armstrong McKay, S. Loriani, J.F. Abrams, S.J. Lade, J.F. Donges, M. Milkoreit, T. Powell, S.R. Smith, et autres, eds. 2023. *Rapport sur les points de basculement mondiaux 2023*. Université d'Exeter, Exeter, Royaume-Uni, 479 pages.
- Levermann, A., A. Griesel, M. Hofmann, M. Montoya, et S. Rahmstorf. 2005. Dynamic sea level changes following changes in the thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 24(4):347-354, <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0505-y>.
- Li, Q., M.H. England, A.M. Hogg, S.R. Rintoul, et A.K. Morrison. 2023. Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic melt-water. *Nature* 615(7954):841-847, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05762-w>.
- Li, Z., M.H. England et S. Groeskamp. 2023. Recent acceleration in global ocean heat accumulation by mode and intermediate waters. *Nature Communications* 14(1):6888, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42468-z>.
- Liu, W., S.-P. Xie, Z. Liu et J. Zhu. 2017. Possibilité négligée d'un effondrement de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique dans un climat en réchauffement. *Science Advances* 3(1), <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601666>.
- Manabe, S., et R.J. Stouffer. 1988. Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *Journal of Climate* 1:841-866, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1988\)001<0841:TSEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1988)001<0841:TSEOAC>2.0.CO;2).
- McCarthy, G.D., et L. Caesar. 2023. Peut-on faire confiance aux projections de l'affaiblissement de l'AMOC basées sur des modèles climatiques qui ne peuvent pas reproduire le passé ? *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 381(2262):20220193, <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0193>.
- Michel, S.L.L., D. Swingedouw, P. Ortega, G. Gastineau, J. Mignot, G. McCarthy, et M. Khodri. 2022. Early warming signal for a tipping point suggested by a millennial Atlantic Multidecadal Variability reconstruction. *Nature Communications* 13(1):5176, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32704-3>.
- Mooney, C. 2015. "Pourquoi certains scientifiques s'inquiètent d'une 'boule' étonnamment froide dans l'océan Atlantique Nord". *Washington Post*, septembre 4, 2015, <https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2015/09/24/why-some-scientists-are-worried-about-a-cold-blob-in-the-north-atlantic-ocean/>.
- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). 2022. *Points de basculement climatiques : Éléments d'appréciation pour une action politique efficace*. Paris, 89 pages, <https://doi.org/10.1787/abc5a69e-en>.
- Osman, M.B., J.E. Tierney, J. Zhu, R. Tardif, G.J. Hakim, J. King et C.J. Poulsen. 2021. Températures de surface résolues à l'échelle mondiale depuis le dernier maximum glaciaire. *Nature* 599(7884):239-244, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03984-4>.
- Piecuch, C.G., et L.M. Beal. 2023. Robust weakening of the Gulf Stream during the past four decades observed in the Florida Straits. *Geophysical Research Letters* 50(18), <https://doi.org/10.1029/2023GL105170>.
- Qasmi, S. 2023. Past and future response of the North Atlantic warming hole to anthropogenic forcing. *Earth System Dynamics* 14(3):685-695, <https://doi.org/10.5194/esd-14-685-2023>.
- Rahmstorf, S. 1996. On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 12(12):799-811, <https://doi.org/10.1007/s003820050144>.
- Rahmstorf, S. 1997. Risk of sea-change in the Atlantic. *Nature* 388(6645):825-826, <https://doi.org/10.1038/42127>.
- Rahmstorf, S. 1999. Des mers changeantes dans l'effet de serre ? *Nature* 399(6736):523-524, <https://doi.org/10.1038/21066>.
- Rahmstorf, S. 2001. A simple analytical model of seasonal open-ocean convection : Part I. Theory. *Ocean Dynamics* 52:26-35, <https://doi.org/10.1007/s10236-001-8174-4>.
- Rahmstorf, S. 2002. Circulation océanique et climat au cours des 120 000 dernières années. *Nature* 419(6903):207-214, <https://doi.org/10.1038/nature01090>.
- Rahmstorf, S., M. Crucifix, A. Ganopolski, H. Goosse, I.V. Kamenkovich, R. Knutti, G. Lohmann, R. Marsh, L.A. Mysak, Z. Wang, et A.J. Weaver. 2005. Thermohaline circulation hysteresis : A model inter-comparison. *Geophysical Research Letters* 32(23), <https://doi.org/10.1029/2005GL023655>.
- Rahmstorf, S., J.E. Box, G. Feulner, M.E. Mann, A. Robinson, S. Rutherford, et E.J. Schaffernicht. 2015. Ralentissement exceptionnel du vingtième siècle dans la circulation de retournement de l'océan Atlantique. *Nature Climate Change* 5(5):475-480, <https://doi.org/10.1038/nclimate2554>.
- Robinson, A., R. Calov, et A. Ganopolski. 2012. Multistabilité et seuils critiques de la calotte glaciaire du Groenland. *Nature Climate Change* 2(6):429-432, <https://doi.org/10.1038/nclimate1449>.
- Romanou, A., D. Rind, J. Jonas, R. Miller, M. Kelley, G. Russell, C. Orbe, L. Nazarenko, R. Latto, et G.A. Schmidt. 2023. Stochastic bifurcation under a midrange future climate scenario with the NASA-GISS ModelE (bifurcation stochastique de la circulation de l'Atlantique Nord dans le cadre d'un scénario climatique futur moyen avec le modèle NASA-GISSE). *Journal of Climate* 36(18):6,141-6,161, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0536.1>.
- Rousi, E., K. Kornhuber, G. Beobide-Arsuaga, F. Luo et D. Coumou. 2022. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia (tendances accélérées des vagues de chaleur en Europe occidentale liées à des doubles jets plus persistants au-dessus de l'Eurasie). *Nature Communications* 13(1):3851, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>.
- Smeed, D.A., B.I. Moat, E.L. McDonagh, G. McCarthy, B.A. King, W.E. Johns, et H.L. Bryden. 2020. Reduction in ocean heat transport at 26°N since 2008 cools the eastern Subpolar Gyre of the North Atlantic Ocean. *Journal of Climate* 33(5):1,677-1,689, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0323.1>.
- Stager, J.C., D.B. Ryves, B.M. Chase, et F.S. Pausata. 2011. Catastrophic drought in the Afro-Asian monsoon region during Heinrich Event 1 (Sécheresse catastrophique dans la région de la mousson afro-asiatique pendant l'événement de Heinrich 1). *Science* 331(6022):1,299-1,302, <https://doi.org/10.1126/science.1198322>.
- Stocker, T., et A. Schmittner. 1997. Influence des taux d'émission de CO₂ sur la stabilité de la circulation thermohaline. *Nature* 388:862-865, <https://doi.org/10.1038/42224>.
- Stommel, H. 1961. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. *Tellus* 13:224-230, <https://doi.org/10.3402/tellusa.v13i2.9491>.
- Supran, G., S. Rahmstorf et N. Oreskes. 2023. Assessing ExxonMobil's global warm-des projections. *Science* 379(6628):eabk0063, <https://doi.org/10.1126/science.abk0063>.

Swingedouw, D., A. Bily, C. Esquerdo, L.F. Borchert, G. Sgubin, J. Mignot et M. Menary. 2021. On the risk of abrupt changes in the North Atlantic subpolar gyre in CMIP6 models (Sur le risque de changements abrupts dans le gyre subpolaire de l'Atlantique Nord dans les modèles CMIP6). *Annales de l'Académie des sciences de New York* 1504(1):187-201, <https://doi.org/10.1111/nyas.14659>.

Thompson, B. 1797. Les œuvres complètes du comte Rumford (1870). *Boston, Académie américaine des sciences* 1:237-400.

Todd, R.E., et A.S. Ren. 2023. Warming and lateral shift of the Gulf Stream from in situ observations since 2001. *Nature Climate Change* 13:1,348-1,352, <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01835-w>.

Trenberth, K.E., Y. Zhang, J.T. Fasullo, et L. Cheng. 2019. Estimations basées sur l'observation des séries chronologiques du transport de chaleur méridien océanique mondial et de bassin. *Journal of Climate* 32(14):4,567-4,583, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0872.1>.

van Westen, R., M.A. Kliphuis et H.A. Dijkstra. 2024. Un signal d'alerte précoce basé sur la physique montre que l'AMOC est sur le point de basculer. *Science Advances* 10(6), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>.

Warren, B.A. 1983. Pourquoi n'y a-t-il pas de formation d'eau profonde dans le Pacifique Nord ? *Journal of Marine Research* 41:327-347.

Weijer, W., W. Cheng, S.S. Drijfhout, A.V. Fedorov, A. Hu, L.C. Jackson, W. Liu, E.L. McDonagh, J.V. Mecking, et J. Zhang. 2019. Stabilité de la circulation méridienne de retournement de l'Atlantique : A review and synthesis. *Journal of Geophysical Research : Oceans* 124(8):5,336-5,375, <https://doi.org/10.1029/2019JC015083>.

Welander, P. 1982. A simple heat-salt oscillator. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 6:233-242, [https://doi.org/10.1016/0377-0265\(82\)90030-6](https://doi.org/10.1016/0377-0265(82)90030-6).

Wood, R.A., A.B. Keen, J.F.B. Mitchell, et J.M. Gregory. 1999. Changing spatial structure de la circulation thermohaline en réponse au forçage atmosphérique du CO₂ dans un modèle climatique. *Nature* 399:572-575, <https://doi.org/10.1038/21170>.

Yin, J., S.M. Griffies, et R.J. Stouffer. 2010. Spatial variability of sea level rise in twenty-first century projections. *Journal of Climate* 23(17):4,585-4,607, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3533.1>.

Zhang, R., et G.K. Vallis. 2007. The role of bottom vortex stretching on the path of the North Atlantic western boundary current and on the northern recirculation gyre. *Journal of Physical Oceanography* 37(8):2,053-2,080, <https://doi.org/10.1175/JPO3102.1>.

Zhang, R. 2008. Coherent surface-subsurface fingerprint of the Atlantic meridional overturning circulation. *Geophysical Research Letters* 35(20), <https://doi.org/10.1029/2008GL035463>.

Zhu, C., Z. Liu, S. Zhang et L. Wu. 2023. Likely accelerated weakening of Atlantic overturning circulation emerges in optimal salinity fingerprint. *Nature Communications* 14(1):1245, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36288-4>.

AUTEUR

Stefan Rahmstorf (stefan@pik-potsdam.de) est professeur à l'université de Potsdam et professeur à l'université de Paris.
Institut de Potsdam pour la recherche sur l'impact du climat, Potsdam, Allemagne.

CITATION DE L'ARTICLE

Rahmstorf, S. 2024. Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point ? *Oceanography*, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2024.501>.

DROITS D'AUTEUR ET UTILISATION

Il s'agit d'un article en libre accès mis à disposition selon les termes de la licence internationale Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui

permet l'utilisation, le partage, l'adaptation, la distribution et la reproduction sur tout support ou dans tout format, à condition que les utilisateurs citent le matériel de manière appropriée, fournissent un lien vers la licence Creative Commons et indiquent les changements apportés au contenu original.