

Mécanismes et conséquences d'une perturbation du Gulf Stream dans un climat qui se réchauffe

Didier Swingedouw

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement. (CEA/CNRS)

Introduction

Le Gulf Stream est ce courant océanique chaud qui se trouve à l'est de la Floride et qui remonte vers les hautes latitudes de l'Europe en traversant tout l'océan Atlantique. Il transporte une énergie colossale, environ 1 million de milliard de Watt (W), soit mille fois la production mondiale d'énergie. Ce transport de chaleur vers les hautes latitudes influence le climat bordant L'Atlantique Nord et fait que deux points placés à la même latitude et donc recevant environ la même énergie solaire, un sur le bord ouest de L'Atlantique, l'autre sur le bord ouest du Pacifique ont des températures hivernales très différentes. Par exemple Bodo (67°N, Norvège) connaît une température moyenne de -2°C en janvier tandis que Nomsk (65°N, Alaska) subit des hivers bien plus rigoureux, avec une température moyenne de -15°C en janvier.

Le réchauffement climatique va modifier les conditions à la surface de l'océan, ce qui peut modifier la dynamique du Gulf Stream et la façon dont il redistribue la chaleur aux moyennes latitudes nord. Ainsi, le dernier rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts Climatique (GIEC, 2001) a examiné la possibilité d'une diminution du Gulf Stream, sans réussir à obtenir de consensus probant sur la question. Beaucoup de travail a été fait depuis, et l'évaluation de la probabilité d'un arrêt de ce courant dans le futur et les conséquences climatiques qui lui seraient associées a fortement progressé. Nous proposons dans ce qui suit d'apporter des éléments de détails quant à la définition exacte du Gulf Stream, afin de mieux cerner les concepts qui lui sont associés. Nous analyserons ensuite l'influence climatique qu'a pu jouer ce courant dans le passé, avant d'analyser ce que nous réservent les prédictions de l'avenir de ce courant, ainsi que ses conséquences climatiques.

1) Le Gulf Stream et la circulation thermohaline

Le Gulf Stream fut découvert dès 1513 par le navigateur Ponce de Leon. Il faut cependant attendre 1777 pour que Benjamin Franklin réalise une étude plus détaillée et trace sur une carte la trajectoire de ce courant. C'est lors de la seconde moitié du XX^{ième} siècle que l'origine physique du Gulf Stream s'éclaircit. Des modèles simplifiés d'océan montrent que le forçage de l'océan par le vent de surface conduit à une circulation superficielle formée de plusieurs cellules en rotation, de quelques milliers de kilomètres de diamètre, appelées gyres. Ces gyres sont asymétriques du fait du travail de la force de Coriolis, lié à la rotation de la Terre. En Atlantique on trouve ainsi une gyre dite subtropicale entre 15°N et 45°N environ, et une gyre subpolaire plus au nord. L'échange de masse et de chaleur entre ces deux gyres est influencé par ce que l'on appelle la circulation thermohaline (THC).. Cette circulation, reliant

surface et profondeur, caractérise la circulation océanique grande échelle, que l'on trouve sur l'ensemble du globe. Mise en évidence par l'Américain Wallace Broecker (1987), il la compare à un gigantesque tapis roulant tridimensionnel (Figure 1). On la nomme thermohaline en référence aux forçages thermique et halin (lié à la salinité) qui génèrent des différences de densité dans l'océan, et qui participent à la dynamique de cette circulation. La distribution spatiale de la THC, avec un transport vers les pôles dans l'Atlantique Nord, contrairement au Pacifique, est déterminée par la localisation des sites de convection. Ces sites de convection se trouvent actuellement dans les mers Nordiques et en mer du Labrador. Ils sont caractérisés par l'occurrence du phénomène de convection hivernale due au refroidissement de l'océan par l'atmosphère. Cette convection forme les eaux denses qui tapissent le fond des océans et qui remonte grâce à la diffusion en profondeur. Ce phénomène de convection est suivi d'un phénomène de plongées des eaux profondes formées, sur le talus océanique. Ceci génère par conservation du volume un appel des eaux de surface pour compenser le transport des eaux en profondeur. Il en résulte un transport de chaleur en surface qui réchauffe le climat des hautes latitudes nord.

Cependant, comme le fait remarquer Carl Wunsch, océanographe américain de renom, l'appellation thermohaline peut prêter à confusion, car cette circulation n'est pas un moteur thermique, ce qui signifie que ce n'est pas le gradient de densité qui nourrit la circulation. Le moteur de la THC est plutôt la diffusion dans l'océan profond, qui "tire" les remontées d'eaux profondes et met en marche le tapis roulant. Cette diffusion est causée par la marée associée au forçage lunaire, et par la turbulence liée au forçage éolien principalement au niveau des 40^{ème} rugissants et des 50^{ème} hurlants dans l'hémisphère sud. Ainsi il apparaît qu'un travail de 10^{12} W fourni à l'océan sous ces deux formes résulte d'un transport de chaleur vers le nord à 30°N de 10^{15} W au moins, ce qui démontre la redoutable efficacité de cette machine thermique. Il faut cependant bien comprendre que ces arguments énergétiques s'appliquent à ce que l'on appelle le « régime permanent », dans le sens où l'on considère que le temps n'intervient pas, et que la circulation thermohaline a eu tout le temps de se mettre dans un état d'équilibre. Quand on sait que dans l'océan, le temps d'ajustement pour atteindre cet équilibre est de 1000 ans, on comprend que le régime transitoire, s'appliquant aux échelles de temps plus courtes, est plus pertinent pour les affaires humaines. De plus la distribution spatiale de la THC, avec un transport de chaleur trans-équatoriale vers le nord dans l'océan Atlantique contrairement à l'océan Pacifique est directement lié à la présence de sites de convection dans les mers nordiques, contrairement au Pacifique nord.

La distribution spatiale de la THC et sa variabilité décennale à séculaire dépend donc de la convection dans les mers nordiques. Or, ce phénomène de convection peut être fortement affecté par la diminution de densité en surface, associée à des changements de température et de salinité. En effet une augmentation de température ou une diminution de salinité atténuerait la densité de surface et pourrait provoquer un arrêt de la convection et donc du transport de chaleur vers les hautes latitudes de l'Atlantique. Afin de mieux évaluer la possibilité de tels changements, il est très utile d'analyser les variations de la THC de par le passé, afin de mieux cerner sa dynamique.

2) Le passé du Gulf Stream

La circulation thermohaline peut être reconstruite pour les climats du passé grâce à des traceurs radioactifs. Historiquement c'est la mesure du carbone 13 dans les sédiments qui a été le premier marqueur de l'intensité de la THC. Les carottes marines obtenues dans l'océan Atlantique permettent donc de renseigner sur l'intensité de la circulation océanique dans le passé. La mesure du carbone 13 dans ces carottes montre que la THC a observé de nombreuses variations dans le passé. Ces évaluations ont été confirmées par le couple protactinium-thorium que l'on peut aussi mesurer dans les carottes marines, et qui fournit des

données plus précises et quantitatives des variations passées de la THC. Ainsi ces différentes mesures ont montré que les nombreuses oscillations climatiques observées lors du dernier million d'années apparaissent être fortement corrélées avec des variations de la THC. Par exemple, les évènements froids, dit de Heinrich, semblent associés à une débâcle de glaciers qui aurait pu ralentir la THC. Plus particulièrement, il y a 12700 ans, a eu lieu la période dite du Dryas récent. Le climat sortait d'une période froide, dite glaciaire, et il y eut un réchauffement de 10 degrés en quelques dizaines d'années, ce qui amena les énormes glaciers que l'on trouvait alors sur l'Amérique du Nord à fondre. Ceci apporta une quantité d'eau douce colossale dans l'océan Atlantique. La THC semble alors avoir connu un ralentissement très important, entre 12700 et 11500 ans, ce qui aurait engendré un refroidissement de l'Europe. Cet épisode met donc en lumière le lien qui existe entre THC et climat. Il montre que ce lien n'est pas seulement théorique, mais est bel et bien observé dans le passé.

L'événement du Dryas Récent a duré environ 1200 ans. Le recouvrement de la THC n'est pas très bien compris, mais l'échelle de temps plaiderait plutôt en faveur d'un arrêt transitoire de la THC qui serait revenue à son état stable ensuite. Cependant, alors que la THC n'avait pas encore été clairement observée, l'océanographe américain Henry Stommel (1920-1992) mit en évidence avec un modèle analytique très simple que cette circulation était soumise à de fortes non-linéarités, liées à l'effet de la salinité sur la densité. Ainsi il a montré que pour un même forçage en eau douce en surface, il pouvait exister deux états stables de la THC, l'un avec un transport de chaleur vers le nord et l'autre sans. Ce résultat théorique a été ensuite remis au goût du jour lorsque des modèles numériques de l'océan mirent en évidence un phénomène similaire, avec la possibilité de plusieurs états stables sous certaines conditions de forçage en eau douce. Très récemment, le climatologue allemand Stefan Rahmstorf a montré avec des modèles numériques relativement avancés que ce phénomène était bien robuste et apparaissait dans la plupart des modèles qu'il analysait. Une intégration de plusieurs millénaires est nécessaire pour observer ces équilibres multiples, c'est pourquoi les modèles plus perfectionnés ne peuvent participer à l'analyse de Rahmstorf. Il apparaît pourtant que certains modèles plus complexes, prenant en compte plus de phénomènes couplant l'océan, l'atmosphère et la glace de mer, avec une résolution spatiale correcte, n'ont pas d'équilibres multiples. Il existe en effet des processus stabilisateurs, souvent liés à la dynamique atmosphérique tropicale ou à la glace de mer, qui permettent d'atténuer les diminutions de la THC. Ceci montre la nécessité de modèles contenant tous ces éléments, ce qui n'est pas le cas des modèles utilisés par Rahmstorf. Il y a donc un débat autour de cette question qui concerne la stabilité de la THC, et pose des questions pour le long terme. On se demande en effet si un arrêt brutal de la THC dû au changement climatique serait quasi irréversible ou non. Pour tenter de répondre à cette question un projet de comparaison de différents modèles couplés océan-atmosphère, correspondant à l'état de l'art en la matière, a été mis en place récemment. Le protocole expérimental consiste à imposer une perturbation en eau douce sur l'Atlantique nord imitant une débâcle de glacier sur 100 ans, puis d'arrêter cette perturbation et d'observer si la THC revient à son état initial ou bien perdure dans un autre état. Ceci afin d'évaluer si la THC actuel possède ou non deux états stables, l'un actif, l'autre inactif. Les résultats montrent que la plupart des modèles retrouvent leur intensité d'origine, mais pas tous. Il faut donc raisonner en terme probabiliste, pour conclure que la THC actuel semble avoir peu de chance de posséder deux équilibres stables pour l'état actuel.

3) Le futur de la THC

Le nouvel exercice du GIEC va se finir en 2007, mais les nouveaux résultats déjà publiés, obtenus avec les modèles couplés haute résolution évoqués précédemment, apportent des éléments de réponse quant au futur de la THC. Tout d'abord, tous les modèles montrent une diminution de la THC avec des différences notables quant à l'ampleur de cette

diminution. Elle serait en moyenne de 25% seulement, et aucun des modèles ne montre un arrêt total de la THC en 2100. Un autre résultat intéressant est le fait que la majeure partie de la diminution de la THC soit causée par le réchauffement climatique direct, qui en augmentant la température des océans, diminuerait la densité en surface des zones de convection, affectant les plongées. Bien que ces modèles ne prennent pas en compte la fonte des glaciers, on semble relativement loin de la fiction énoncée dans le film "Le jour d'après". L'impact climatique est lui aussi bien plus modeste que celui observé dans ce film hollywoodien. Le résultat principal qui ressort étant que la diminution de la THC ne provoquera pas un refroidissement de l'Europe, son effet serait plus faible que le réchauffement dû au gaz à effet de serre, et semblerait plutôt atténuer localement, autour du bassin atlantique, le réchauffement global.

L'effort d'observation du système Terre permet de valider les modèles climatiques et donc de donner du poids à leurs prédictions. Des observations de la salinité en Atlantique Nord ont été mises en place depuis un demi-siècle, et une nette tendance à la baisse apparaît, validant donc ce que prédisent les modèles. La THC est par contre très complexe à observer du fait de sa branche profonde. Il a fallu attendre la dernière décennie avant qu'un système de mesures fiables se mette en place. Il y a bien quelques mesures isolées il y a 40 ans, mais le manque de résolution temporelle limite les conclusions que l'on peut apporter quant à une tendance de ralentissement de la THC. Il faudra donc attendre encore un peu avant de savoir si la THC commence déjà à diminuer comme l'a prétendu peut-être un peu hâtivement l'océanographe anglais Harry Bryden. Ce dernier a montré, avec un jeu de mesures trop court pour vraiment conclure, que la THC avait diminué de 30% ces dernières années. Or les modèles ne montrent pas une telle diminution pour l'heure actuelle mais dans quelques décennies. Deux hypothèses peuvent expliquer ce désaccord : (i) l'échantillon d'observations est effectivement trop court, et ce que Bryden a vu est juste une oscillation interne du système dont la période d'oscillation est de l'ordre de la décennie ; (ii) les modèles ne représentent pas bien certains processus amplificateurs, au niveau de la dynamique océanique ou bien au niveau des forçages de l'océan de surface. Plaidant en faveur de cette seconde hypothèse est le fait que peu de modèles participant au GIEC-2007 ne prennent en compte la fonte des glaciers. La fonte actuelle est cependant trop faible pour expliquer à elle seule une diminution de la THC. Elle risque par contre de jouer un rôle croissant lorsque le climat se réchauffera encore.

En effet, nous avons montré avec une équipe de chercheurs français du LSCE que la prise en compte de cette fonte pouvait avoir une forte influence sur la diminution de la THC dans les années à venir. Nos résultats ont en effet aussi montré que la fonte des glaciers pouvait amener le modèle à passer un seuil, et conduire la THC vers un arrêt presque total pour au moins 500 ans. Dans ce modèle, l'arrêt de la fonte du Groenland permet cependant à la THC de retrouver sa vigueur d'antan, confirmant l'analyse de la partie précédente sur la bi-stabilité de la THC. La perturbation anthropique de l'homme aurait dans ce cas là un effet inférieur au millénaire pour la THC. Les implications d'un arrêt de la THC seraient cependant importantes climatiquement, créant une différence de près de 10 K autour de la mer de Barents, affectant donc le climat au niveau des hautes latitudes nord.

Conclusion

Le futur de la THC est donc toujours matière à controverse, bien que des améliorations dans les modèles aient permis de limiter un peu l'incertitude. Les observations de ce courant marin grande échelle ont aussi fortement progressé ces dernières années, mais il va falloir attendre encore quelques années avant d'avoir des résultats statistiquement significatifs. Le futur de la THC génère beaucoup d'inquiétude du fait de sa forte non-linéarité qui semble pouvoir générer une forte sensibilité, et à cause de l'existence de seuil précis menant à un arrêt

de cette circulation. La question de savoir si le changement climatique va pousser la THC à franchir ce seuil est toujours ouverte. Les conséquences d'un arrêt de cette circulation sont cependant complexes. Sa suppression aurait comme effet de refroidir l'Europe, mais comme l'ensemble du monde se réchaufferait à grande vitesse, il apparaît que l'effet cumulé de ces processus antagonistes serait, même localement, légèrement en faveur des gaz à effet de serre, l'arrêt de la THC diminuant fortement le réchauffement local. Il ne faut donc pas tomber dans le catastrophisme exacerbé, l'arrêt de la THC pourrait d'un certain point de vue limiter le réchauffement climatique sur L'Atlantique Nord. Cependant, changer les grands équilibres climatiques liés à l'océan est un jeu dangereux qui peut réserver des surprises. Une modification de la THC pourrait en effet influencer sur les tropiques en modifiant le lieu des précipitations, ce qui aurait des conséquences importantes pour les pays concernés en terme d'approvisionnement en eau. De plus un arrêt de la THC aurait des conséquences sur la biochimie de l'océan, et affecterait les chaînes trophiques très fragiles de l'océan. Améliorer les prévisions du devenir de la THC et analyser avec précision les risques associés à une diminution de cette circulation océanique sont les défis des années à venir, et devrait permettre de mieux se préparer à la complexité des changements climatiques futurs.

Bibliographie

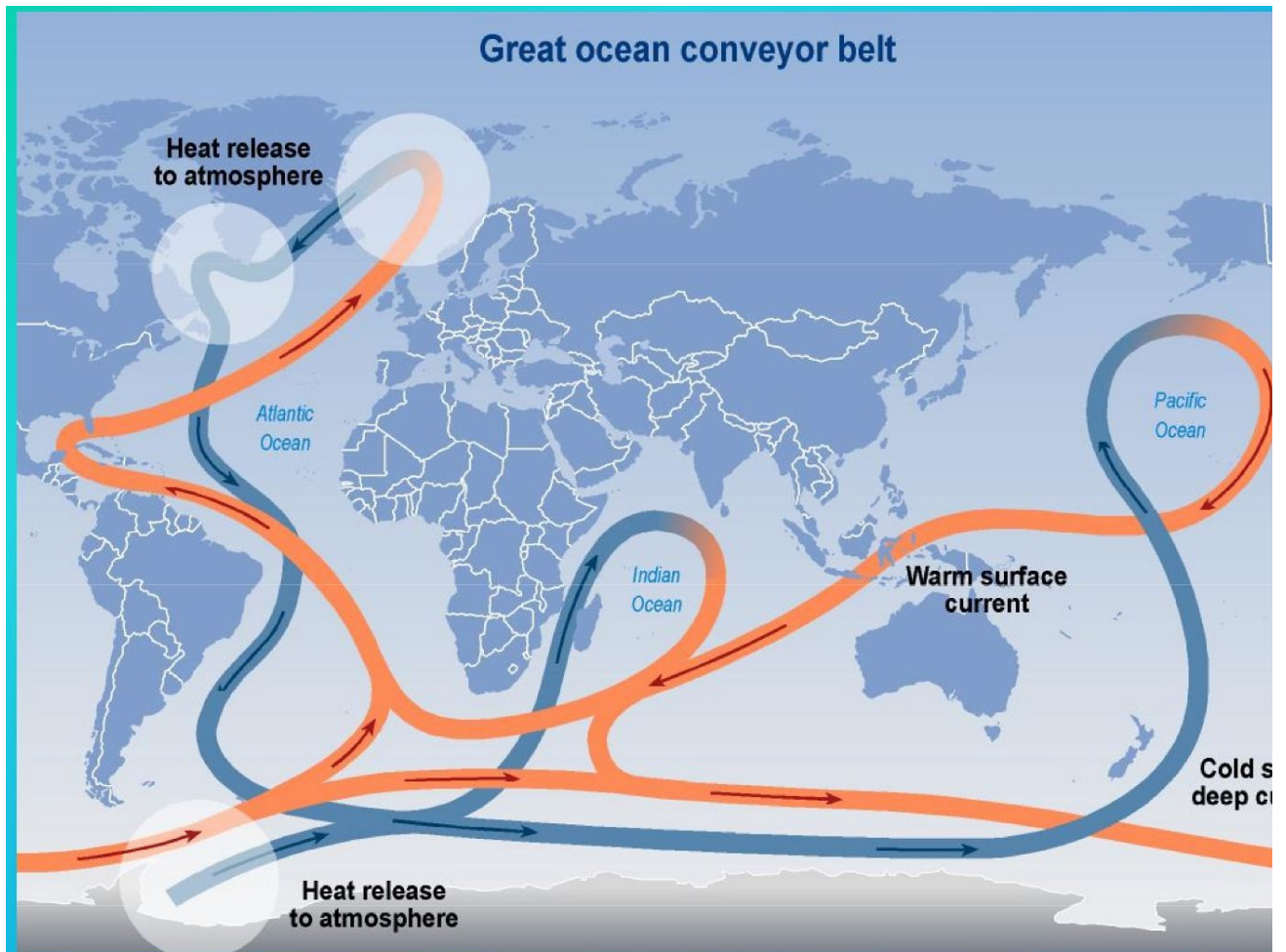


Figure1 : Schéma simplifié de la circulation thermohaline, comparé à un tapis roulant (GIEC, 2001). Les courants chauds de surface sont représentés en bleu, les courants froids en profondeurs sont en bleus. Une importante quantité de chaleur est relachée par l’océan vers l’atmosphère en hiver au niveau des sites de convection en Atlantique Nord et en mer de Weddel.