



Compte rendu de l'atelier LEFE/IMAGO

Observer et comprendre l'AMOC

(Observing and understanding the Atlantic Meridional Overturning Circulation)

Date de l'atelier : 3-5 Mai 2017

Lieu de l'atelier : IUEM, Plouzané

Site web de l'événement : http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Didier/public_html/COLLOQUE/Final/

Organisation / Animation : Pascale Lherminier, Didier Swingedouw, Frédérique Eynaud

Objectifs de l'atelier

Le programme LEFE-IMAGO s'intéresse à la dynamique du système climatique en adoptant une approche pluri-disciplinaire et en se concentrant sur la compréhension des processus en jeu à différentes échelles de temps et d'espace. C'est en suivant cet esprit qu'ont été construites les journées LEFE-IMAGO 2017, en proposant de mettre en avant un phénomène clef pour l'océan mondial et son impact sur le climat : la circulation de retournement en Atlantique (acronyme anglais : AMOC).

La conférence proposée visait à proposer un état des lieux des connaissances sur cette circulation océanique de grande échelle dans le passé, présent et futur. Pour aborder ces différents aspects et échelle de temps, elle s'est articulée autour de cinq sessions qui abordaient l'observation *in situ* récente de l'AMOC, sa reconstruction sur des échelles de temps plus longues à l'aide d'observations paléoclimatiques, et les différentes théories concernant sa dynamique, basées sur des arguments fondamentaux ou sur des modèles numériques. Les intitulés des cinq sessions étaient les suivants (en anglais, comme dans le programme officiel) :

1. *Instrumental observations of the AMOC*
2. *Paleo-climatic reconstructions of the AMOC*
3. *Drivers of the AMOC: Theoretical approaches*
4. *Lessons from numerical modelling of the ocean and climate for the AMOC dynamics*
5. *Climatic impact and implications of AMOC variations*

Le programme, incluait une mise en relief d'experts nationaux et internationaux invités grâce au soutien LEFE, et a permis l'intervention de nombreux autres spécialistes dont les résumés et présentations sont téléchargeables sur le site web de l'événement : http://www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/Didier/public_html/COLLOQUE/Final/



Nous souhaitons remercier le partenariat de l'Ifremer qui a permis de mettre en place une visite et un diner cocktail à l'Océanopolis de Brest, offrant un cadre unique pour poursuivre les discussions et les rencontres dans un contexte détendu et très convivial.

Dans ce qui suit est donné un résumé des présentations et discussions des différentes sessions.

Session 1 : Instrumental observations of the AMOC

Cette session était composée de deux présentations invitées et quatre autres présentations orales. Les résultats principaux de OVIDE et RAPID, les deux grands programmes d'observation de l'AMOC en Atlantique Nord depuis plus d'une décennie, ont été présentés. Alors que OVIDE propose un index de MOC entre le Groenland et le Portugal, reconstitué dès 1993 à partir des données in-situ et satellitaires et validé par les données de campagnes tous les 2 ans depuis 2002, RAPID s'appuie sur un réseau de mouillage à 26°N pour proposer une série temporelle de l'AMOC observée à cette latitude depuis 2004. Les deux séries temporelles ne sont pas directement comparables, car l'AMOC observée au niveau de la section OVIDE incorpore une variabilité propre au gyre subpolaire dont l'intensité s'élève en moyenne à environ un quart de l'amplitude totale estimée. Ainsi, les deux observatoires se complètent : OVIDE est au plus près des sources de variabilité et apporte des éléments de prévisibilité climatique, sur la forte variabilité décennale en particulier et sur le stockage du carbone anthropique ; RAPID met en exergue le signal qui est exporté vers les basses latitudes, avec une variabilité décennale plus faible et une tendance significative à l'affaiblissement depuis 2008 (environ 15%). Les relations entre AMOC, North Atlantic Oscillation (NAO) et Atlantic Multidecadal Variability (AMV, ou AMO pour «Oscillation») ont été identifiées comme des enjeux majeurs de compréhension de la variabilité climatique en Europe du Nord. Ce point a été à nouveau souligné lors de la dernière présentation, qui montrait qu'aux échelles décennales, dans la salinité de surface (SSS) varie en phase avec l'AMO dans le gyre subpolaire alors qu'elle présente un délai d'environ 10 ans dans l'Atlantique tropical. Dans ces deux bassins, cette variabilité se superpose à des tendances opposées, avec une salinisation des eaux de surface tropicales et un adoucissement des eaux de surface subpolaires depuis 1896.

L'AMOC est associée au flux de chaleur des tropiques vers les pôles dans l'océan Atlantique. Cette quantité est particulièrement importante dans l'équilibre climatique de la planète, mais l'observer sur l'ensemble de l'océan de façon synoptique est particulièrement ardu. Une moyenne des flux de chaleur intégrés zonalement de 35°N à 60°N ainsi qu'une décomposition ont été présentées, fondée sur la reconstruction de la circulation géostrophique des années 2000 à partir des déplacements et des profils des flotteurs ARGO. La présentation suivante s'est ensuite attachée à comparer les processus de convection profonde en Mer Méditerranée et en Mer d'Irmingier afin de mieux comprendre la variabilité des propriétés des eaux profondes formées.

La discussion a naturellement portée sur la comparaison des deux séries temporelles de l'amplitude de l'AMOC aux latitudes subpolaires (OVIDE) et aux latitudes subtropicales (RAPID). Au-delà de la remarquable variabilité intra-annuelle à RAPID (forcée par le vent) et décennale à OVIDE, qui sont peu ou pas corrélées, notre compréhension actuelle du système (qui nous vient essentiellement des modèles, sessions 3 et 4) nous laisse penser qu'aux



échelles de temps plus longues que les observations actuelles, nous devrions trouver une corrélation entre les deux séries temporelles via l'export des eaux profondes formées dans le gyre subpolaire et les mers nordiques. De fait, la forte variabilité de la circulation, et de l'AMOC en particulier, propre au gyre subpolaire, masque pour le moment toute corrélation. Une série temporelle à 41°N serait probablement très utile. Par ailleurs, les expériences de flotteurs dans les années 2000 remettent en question la continuité du Courant Profond de Bord Ouest, mettant en évidence des routes profondes « intérieures », en particulier dans la couche de l'Eau de la Mer du Labrador. Cette observation explique en partie la difficulté de comprendre la connexion entre latitudes subpolaires et subtropicales. Une autre question cruciale est de comprendre la relation entre l'amplitude de l'AMOC et la formation d'eau dense dans les bassins d'Irminger et du Labrador. C'est un des enjeux du programme international OSNAP.

Les processus à l'origine des anomalies froides et des fortes convections dans le gyre subpolaire ont ensuite été discutées (NAO, EAP...) : bien que l'anomalie de 2014 qui perdure actuellement est comparable à celle du début des années 90, leur origine semble différente. Il a été souligné que le spectaculaire refroidissement du gyre subpolaire depuis 3 ans est en grande partie attribué aux échanges air-mer, alors que le « warming hole », à savoir l'absence de réchauffement au large de Terre Neuve depuis un siècle, serait plutôt associé à l'AMOC. C'est ce qui rend complexe la corrélation entre SST et AMOC, car la corrélation entre AMOC et température est vue plus en profondeur à RAPID. Cependant, les séries temporelles sont trop courtes pour parler de tendance, nous pouvons au mieux parler de variabilité pluri-décennale. Une question a été soulevée sur les différences entre calculer l'AMOC en profondeur ou en densité ; le fait est que le calcul en profondeur n'a pas trop de sens pour OVIDE en raison de son extension zonale, mais à 26°N, les 2 calculs sont comparables.

Session 2 : *Paleo-climatic reconstructions of the AMOC*

Cette session a réuni deux présentations invitées et deux autres présentations orales, appuyées de plusieurs posters. Les questions abordées par les intervenants ciblaient la mise en évidence des bascules abruptes de l'AMOC via leur détection dans les archives sédimentaires marines. Ces bascules rapides témoignent d'états extrêmes de l'océan, alors marqué par des changements drastiques des conditions de surface comme de fond et ce en étroite intraction avec les réservoirs cryosphériques et atmosphériques. Les échelles de temps abordées, ont également permis de souligner l'existence d'une variabilité importante sur des interglaciaires comme le nôtre (Holocène) et /ou équivalent au nôtre (Dernier interglaciaire, Eémien), mais également sur la dernière période glaciaire pour laquelle des ralentissements de la circulation profonde sont enregistrés de façon robuste dans l'Atlantique.

Ces archives paléoclimatiques constituent autant d'exemples de la variabilité naturelle (extrême) que l'AMOC peut présenter, notamment sous contrôle de facteurs internes comme l'effondrement répété des glaciers boréaux lors des phases glaciaires, contraignant de la même manière niveaux marins, extension de la glace de mer et débâcles d'icebergs qui peuvent s'étaler très au sud en latitude.



La discussion a fait le point sur le type d'archives qu'il était nécessaire d'obtenir pour illustrer aux mieux cette variabilité de l'AMOC, et a aussi mis en exergue les limites des approches paléoclimatiques qui dépendent de critères qualitatifs des archives sédimentaires (taux de sédimentation suffisants, robustesse des contraintes d'âges et des proxies...).

Session 3 : Drivers of the AMOC: Theoretical approaches

Cette session, articulée autour de deux présentations invitées et de deux autres présentations, s'est intéressée aux aspects énergétiques et théoriques de la dynamique de l'AMOC. La question de savoir si l'AMOC est « tirée » par le mélange vertical ou « poussée » par la convection profonde est ancienne et délicate à formaliser. Un nouveau cadre théorique a été proposé, qui met en évidence le rôle clef de la convection océanique profonde, qui apparaît comme une source d'énergie potentielle disponible qui va fournir de l'énergie cinétique au déplacement grande échelle de l'AMOC. L'intensité de cette conversion est contrôlée par la quantité de mélange vertical disponible. Ce cadre théorique permet donc de mieux comprendre le rôle joué par les deux processus (convection et mélange) qui influencent l'AMOC et remet au centre la convection océanique dans l'énergétique de l'AMOC.

Une nouvelle méthode d'évaluation du mélange vertical dans l'océan global à partir de climatologie en température et salinité a ensuite été présentée, faisant écho à la détermination du rôle précis de ce mélange dans la dynamique de l'AMOC.

Une autre présentation invitée s'est ensuite intéressée à un mode clef de la variabilité multi-décennale de l'AMOC situé en Atlantique Nord. Ce mode, présent dans des modèles très simples d'océan avec des forçages climatologiques, est intrinsèque à l'océan. Il tire son énergie de l'instabilité barocline et génère une onde grande échelle de type Rossby qui se propage de l'est de l'Atlantique Nord vers l'ouest, où elle induit par géostrophie des changements de circulation zonale puis méridienne qui impactent sur l'AMOC. Ce mode, dont l'échelle caractéristique est pluri-décennale (dépendant de la stratification de l'océan) a été également trouvé dans des modèles couplés océan-atmosphère (OAGCM), mais reste toujours difficile à détecter dans les observations, possiblement du fait de leur manque de longueur temporelle et d'extension en profondeur.

Enfin, une dernière présentation s'est intéressée au rôle que pourrait jouer l'océan Arctique sur le devenir de l'AMOC dans les décennies à venir, en se basant sur une approche d'estimation de la sensibilité de l'AMOC à différents paramètres, basée sur une méthode d'inversion via un modèle adjoint.

La discussion a porté sur l'utilité de telles connaissances théoriques pour mieux comprendre le comportement des modèles climatiques complexes, afin notamment d'isoler les paramètres décisifs pour le réglage de l'AMOC dans les modèles de climat. Étant donné le peu de contribution reçu pour cette session, nous avons également été amenés à nous interroger sur le manque de place donné à de telles thématiques théoriques dans la formation des jeunes générations (sujet de thèse etc.).

Session 4 : Lessons from numerical modelling of the ocean and climate for the AMOC dynamics



Cette session s'est articulée autour de deux présentations invitées et quatre présentations orales, ainsi que deux posters. Les deux présentations invitées se sont intéressées principalement à la variabilité des modèles océaniques forcés au cours des 60 dernières années. Malgré leurs limitations inhérentes aux conditions aux limites à la surface, et notamment en eau douce, ils permettent une modélisation fine de la dynamique océanique. La variabilité de ces simulations numériques (échelle de temps mensuelle à pluri-annuelles) a été comparées aux observations de la section RAPID et montrent un accord satisfaisant qui donne confiance en leur résultat. L'importance de quantifier l'AMOC dans le gyre subpolaire en coordonnées sigma a été soulignée. De grandes différences de représentation de l'état moyen de l'intensité et de la structure de l'AMOC selon de le modèle d'océan considéré a aussi été mis en exergue.

Il a été montré que les grandes variations de l'AMOC sur les 60 dernières années sont marquées par une diminution dans les années 60, suivie d'une augmentation maximum à la fin des années 90, suivi d'une nouvelle diminution. Ces variations sont en premier lieu associées aux changements de flux de densité en surface plutôt qu'aux variations du stress de vent, en accord avec la théorie développée dans la session 3. Une grande partie de ces variations de flux de flottabilité est liée aux variations décennales de la NAO.

La comparaison des simulations océaniques forcés avec les simulations de modèles couplés océan-atmosphère a montré que ces dernières avaient beaucoup moins de variance que les premières. Cette différence peut s'expliquer en partie par des excursions de NAO à basse fréquence plus importante sur les 60 dernières années que dans les modèles couplés.

Les modèles numériques permettent également de mettre en évidence des signatures de l'AMOC qui ont le potentiel d'être plus facilement observables que l'AMOC directement. Il a été montré en particulier que les variations de niveau marin dans la gyre subpolaire, menant l'AMOC de 2 à 3 ans, pourraient donc constituer un précurseur observable dans les années à venir, grâce aux données altimétriques, des variations de l'AMOC.

Une présentation a ensuite montré les variations de l'AMOC dans les réanalyses océaniques qui montrent une très grande dispersion dans l'état moyen et leur variabilité de l'AMOC. Ces différences semblent associées à une forte sensibilité des zones de convection à l'assimilation de données.

Une présentation a mis en évidence le rôle important de la turbulence méso-échelle dans la variabilité de l'AMOC à l'aide d'ensemble de simulations forcés océaniques à très haute résolution ($<0.1^\circ$). Cette influence de la turbulence peut représenter jusqu'à près de la moitié de la variabilité aux latitudes subtropicales, tandis qu'elle est inférieure au quart au niveau de la gyre subpolaire.

Une autre présentation a montré l'influence possible de l'*overflow* méditerranéen sur l'AMOC, motivé par les événements de forte diminution de ce flux au début de l'Holocène. L'effet principal détecté est celui d'une diminution de l'AMOC. Enfin, une présentation a montré la possibilité de mise en place de convection dans l'Arctique dans un scénario de quadruplement de la concentration de dioxyde de carbone.

La discussion a porté sur la différence de conclusions entre une présentation de la session 3 et une de la session 4 concernant l'impact des changements en cours dans



l'Arctique sur la circulation océanique, sans qu'il soit possible de conclure formellement sur l'origine de ces différences.

Session 5 : Climatic impact and implications of AMOC variations

Cette session s'est articulée autour de deux présentations invitées et six présentations orales, ainsi qu'un poster. Les présentations invitées ont mis en avant les impacts climatiques de la variabilité de l'AMOC. Ses impacts sont principalement liés au fort transport de chaleur associé à l'AMOC, dont la signature en SST dans les modèles de climat ressemble au mode de variabilité observé AMV. Ses impacts concernent également la couverture de glace de mer en Arctique, les précipitations dans la ceinture tropicale, principalement dans l'Atlantique ainsi que la formation des cyclones tropicaux dans l'Atlantique tropical Nord.

Les mécanismes expliquant les variations de l'AMOC ont également été résumés, et une certaine convergence autour de certains processus clés comme le mode associé aux ondes de Rossby grande échelle, telle qu'expliqué dans la session 3, semblent présents dans un certain nombre de modèles. L'implication de cette variabilité de l'AMOC est qu'elle possède une forte prévisibilité décennale dans les simulations numériques couplées océan-atmosphère, malgré la perturbation de leurs conditions initiales. Les conséquences d'une telle prévisibilité sont associées aux impacts climatiques décrits ci-avant. Des systèmes de prévisions décennales du climat, qui s'efforcent de lancer les simulations au plus proches des observations océaniques récentes, montrent en effet une capacité prédictive plus importantes que les simples projections climatiques, en large partie due à l'Atlantique Nord et sa forte prévisibilité.

Une présentation a également montré dans des simulations couplées, rappelées vers une AMV typique, que l'impact de l'AMV s'étendait également à l'océan Pacifique, avec le développement d'une phase négative du premier mode de variabilité décennale de la SST dans le Pacifique, l'IPO, en réponse à une AMV positive, due à la réponse des vents du Pacifique tropical aux anomalies de température dans l'Atlantique tropical. Une autre présentation s'est intéressée au refroidissement de ces dernières années de la gyre subpolaire, et a montré qu'il pouvait être en partie lié à une diminution de l'AMOC les années d'avant.

Enfin, trois présentations se sont intéressées aux interactions océan-atmosphère sur la variabilité de l'AMOC. L'une a montré que ces interactions étaient clef dans l'amplitude des variations de l'AMOC dans les modèles couplés, l'autre a mis en évidence la réponse de la circulation atmosphérique en hiver à l'AMOC et l'AMV, avec notamment une phase négative de la NAO en réponse à une AMOC ou AMV positive. Enfin une dernière présentation a également montré l'influence de l'AMV et de l'IPO sur les variations du rail des dépressions de tout l'Atlantique Nord. Une dernière présentation s'est intéressée à l'importance de la phase de l'AMV pour la réponse du système climatique à une éruption volcanique de type Pinatubo, et mis en évidence qu'une AMV négative favorisait une réponse de type NAO+, avec moins de régime de temps de type NAO-, en comparaison d'une AMV positive.

Discussion générale



La discussion générale a d'abord porté sur les liens possibles à mettre en place entre la communauté observationnelle, et OVIDE en particulier, et les communautés de modélisation océan forcé et couplé océan-atmosphère. Il a été mis en avant les exercices en cours allant dans ce sens, notamment au sein du projet européen Blue-Action. L'outil PAGO a également été évoqué, puisqu'il permet le calcul de différentes quantités dans les modèles (transports...) au niveau des sections observées.

L'idée d'essayer de reconstruire plus finement l'AMOC dans le passé récent, avant la mise en place des sections RAPID, a également été abordé. Les méthodologies basées sur le niveau marin, telles que mise en évidence par le groupe de recherche OVIDE notamment semble prometteuse en ce sens. Le lien entre circulation et niveau marin est en effet fort, si bien que l'utilisation de séries temporelles longues de marégraphes apparaît comme prometteur.

En effet, il a été relevé que la durée des séries observées reste trop courte pour valider les modes de variabilité décennaux, si bien qu'il apparaît important de remonter dans le passé. Sur ce sujet, les compilations récentes de données hydrologiques, de salinité notamment, ont été saluées. Il a été envisagé de mettre en place une méthodologie de détection-attribution sur une reconstruction de salinité couvrant tout le siècle dernier, afin d'essayer de comprendre ce qui a causé les variations séculaires observées.

Sur le propos de la longueur des séries temporelles, la paléo-océanographie est apparue comme très utile pour remonter plus loin encore que les données instrumentales. Sur cette thématique, il a été mis en avant le besoin de simuler dans les modèles les proxies observés pour permettre d'évaluer correctement leur lien exact avec la circulation de grande échelle.

La question des échelles de temps analysées est ensuite apparue naturellement, étant donné que les reconstructions paléoclimatiques peuvent avoir des résolutions temporelles inférieures au siècle. Sur cette thématique, la communauté paléo-climatique a demandé s'il existait des efforts autour de la modélisation climat-calotte à des grandes échelles de temps, c'est à dire avec un modèle de climat permettant des intégrations longues. Ce n'étaient pas le cas concernant les personnes dans la salle, mettant en exergue un manque possible d'interactions entre communautés.

Dans le même sens, la communauté modélisation a mis en avant le manque de représentants des données du dernier millénaire, qui semblent clef pour justement progresser sur la connaissance de la variabilité décennale. En ce sens, l'Holocène plus généralement apparaît comme une période de grand intérêt, mais nécessite également un effort important coté modélisation pour envisager des simulations transitoires longues.

Ensuite la discussion a porté sur d'autres composantes de la circulation océanique qui pourrait jouer un rôle fondamental sur le climat. La gyre subpolaire en Atlantique Nord a en particulier été évoqué, comme possiblement expliquant une grande partie de la prévisibilité climatique en plus de l'AMOC. L'interaction exacte entre circulation barotrope (gyre) et barocline (AMOC) reste en effet encore mal comprise et nécessite d'être clarifiée. De même la compréhension des différentes masses d'eau qui structurent l'AMOC nécessite également un effort de recherche particulier, en regard notamment de la grande diversité des AMOC simulées par les différents modèles d'océan forcé.



Ceci nous a amené aux aspects de modélisation qui mériteraient d'être améliorés. En premier lieu, il a été mis en avant que les *overflows* au niveau des détroits du Danemark et d'Islande sont toujours mal représentés dans les modèles et nécessitent encore des efforts de développement de paramétrisations. L'idée de relaxer vers les observations au niveau des détroits a été évoquée, de même que l'idée de zoom de type AGRIF au niveau des détroits pour obtenir une meilleure résolution. L'interaction avec la glace de mer concernant la formation des masses d'eau a également été discutée, et demande donc un effort important concernant la modélisation de la glace de mer et ces interactions avec l'océan (phénomène de *brines*, etc.).

Présentations disponibles sous : <http://www.umr-lops.fr/Recherche/Equipe-Ocean-Climat/Evenements/Colloque-AMOC-LEFE-IMAGO-2017>

Rédacteurs : Didier Swingedouw, Pascale Lherminier, Frédérique Eynaud