

Référence du projet : AO2010- 505140

Nom du porteur du projet : Thierry Huck (CR1 CNRS au LPO)

**Titre du projet : Ti Ammo -
Theoretical Investigations of the Atlantic Multidecadal to Millennial Oscillations**

Nouveau projet demandé pour 3 ou 4 ans

Intérêt scientifique et objectifs

L'objectif de ce projet est de mettre en commun les expertises complémentaires des différents laboratoires impliqués pour contribuer à une meilleure compréhension des modes de variabilité dominants dans l'Atlantique Nord sur les périodes décennale, multidécennale (Atlantic Multidecadal Oscillations), et millénaire (Dansgaard Oeschger) en utilisant les observations, la modélisation réaliste et idéalisée, et la théorie. Cette synergie est indispensable pour avancer sur un sujet difficile où chaque approche menée de manière indépendante propose actuellement un panorama extrêmement varié et non-consensuel. L'adjectif "théorique" dans le titre du projet n'est donc pas restrictif mais précise que les analyses de la variabilité proposées se focalisent sur la compréhension des modes de variabilité plus que sur leur description, afin de mettre en avant le contraste avec des approches numériques cherchant à reproduire au mieux la variabilité du climat observée. Ici l'usage d'une hiérarchie de modèles océaniques et couplés est fondamentale afin de tester la robustesse des mécanismes proposés (Held 2005, Nof 2008, Colin de Verdière 2009).

Les principales étapes du programme de travail suivent :

- analyse des oscillations multidécennales dans l'Atlantique dans les observations, les modèles forcés et les modèles couplés ; distinction du signal de réchauffement climatique ; confrontations aux modes de variabilité issus des modèles idéalisés afin de déterminer les mécanismes ;
- extension de la théorie des modes de bassin océaniques avec topographie, et à une configuration réaliste ; analyses de stabilité linéaire et généralisée ;
- développement d'un modèle couplé NEMO ORCA2LIM-SPEEDY permettant des intégrations multimillénaires pour analyser la stabilité de la circulation thermohaline, les bassins d'attraction des équilibres, les régimes d'oscillations centennaires et millénaires, les réponses aux changements externes (anthropiques, orbitaux).

Participants :

LPO : Olivier Arzel (50%), Alain Colin de Verdière (50%), Thierry Huck (70%), Dhouha Ferjani (doctorante MESR 100%) ;

ITA : Patrice Bellec (50%), Claude Talandier et/ou Nicolas Grima (15%)

LOCEAN : Sabine Février (35%), Christophe Herbaut (15%), Jérôme Sirven (35%)

LSCE : Didier Swingedouw (50%)

Yale University : Florian Sévellec (50%)

Collaborateurs :

LOCEAN : Marie-Noëlle Houssais, Juliette Mignot

LSCE : Didier Paillard, Didier Roche

Equipe Drakkar (LEGI LOCEAN LPO)

Table des matières

Intérêt scientifique et objectifs.....	1
D - Périodes décennales à multidécennales.....	3
D.1 Variabilité naturelle vs forcée dans les modèles océan et couplés.....	3
a) Détection attribution des variations récentes du bilan hydrologique.....	3
b) Détermination de la variabilité naturelle en Atlantique Nord.....	3
D.2 L'AMO - Atlantic Multidecadal Oscillation.....	4
a) Développement du modèle couplé NEMO-SPEEDY.....	4
b) Rôle de l'état moyen.....	4
c) Influence de la nonlinéarité de l'équation d'état et des conditions aux limites sur TS selon la résolution.....	5
d) Rôle des interactions air-mer à l'échelle de la méso-échelle océanique.....	6
D.3 Variabilité de l'océan interne et forcée.....	6
a) Résonance de la réponse du Gulf Stream aux anomalies de vent.....	6
b) Réponse de la thermocline à un forçage variable.....	7
c) Influence de la glace de mer dans la variabilité des modèles océaniques.....	7
D.4 Modes de bassin océanique – cadre linéaire.....	7
a) Interactions ondes-bathymétrie.....	8
b) Modes de bassin avec topographie variable.....	8
c) Modes de bassin en configuration réaliste.....	8
d) Perturbations et variabilités optimales de la circulation océanique.....	8
M - Périodes centenaires et millénaires.....	9
M.1 Equilibres multiples et oscillations millénaires.....	9
M.2 Les oscillations centenaires comme précurseurs des millénaires.....	9
M.3 Régularité de l'oscillation millénaire.....	9
S - Stabilité de la circulation thermohaline (THC).....	10
S.1 Stabilité de la THC et augmentation des gaz à effets de serre.....	10
S.2 Influence de la résolution sur la stabilité de la THC.....	10
Références.....	11
Calendrier de réalisation.....	12
Résultats attendus.....	13
Moyens nécessaires à la réalisation du projet.....	13
Co-financements acquis ou soumis (hors INSU).....	13
Valorisation des travaux antérieurs.....	13
Références bibliographiques de l'équipe 2006-2009.....	13
Liste des contrats obtenus au cours des quatre dernières années.....	15
Compléments.....	15

D - Périodes décennales à multidécennales

Les observations océaniques montrent, dans l'Atlantique Nord, des oscillations sur des périodes interannuelles à multidécennales de même amplitude que le réchauffement climatique. Bien comprendre la signature et le mécanisme de cette variabilité est indispensable pour évaluer précisément le réchauffement, et prédire l'évolution du climat. Une large gamme de modèles océaniques et couplés (idéalisés, réalistes, forcés, libres) produisent des oscillations dans cette gamme de fréquence mais les périodes et les mécanismes associés restent très variés ! Afin d'ajouter notre pierre à cette diversité, nous regarderons si de telles oscillations existent dans les simulations de l'IPSL et les analyseront. Des modèles simplifiés seront alors utilisés pour étudier leur mécanisme : variabilité océanique forcée par l'atmosphère (D3), modes de bassin océanique (D4), ou réels modes couplés (D1-D2) ?

D.1 Variabilité naturelle vs forcée dans les modèles océan et couplés

a) Détection attribution des variations récentes du bilan hydrologique

En parallèle aux analyses de la température océanique de Barnett et al. (2005), on se propose ici de comparer les variations de salinité et de flux d'eau douce dans des simulations de la période récente par les CGCMs participant au GIEC avec les observations récentes et éventuellement des réanalyses océaniques. La méthode des "empreintes digitales" sera mise en place pour projeter les différences entre modèles et observations dans un espace commun, afin de calculer une métrique cohérente pour ces différences. Il sera aussi nécessaire d'analyser des simulations de contrôle en condition préindustrielle pour isoler l'existence de mode de variabilité interne multidécennale de la salinité et de la température dans ces modèles et de comparer leur amplitude avec les variations observées ces 50 dernières années. On analysera aussi la tendance de changement de salinité et de température dans les simulations forcées par les gaz à effets de serre d'origine anthropique ainsi que le forçage radiatif naturel (volcan, solaire). Ceci devrait permettre de déduire si les modèles réussissent à reproduire les tendances observées en salinité et température pour ces 50 dernières années en Atlantique Nord et si cette tendance est due à une variabilité interne du système ou plutôt à l'augmentation de température de surface liée au forçage anthropique, ou bien encore aux forçages solaire et volcanique.

b) Détermination de la variabilité naturelle en Atlantique Nord

Vu la courte période instrumentale, la détermination de la variabilité naturelle en Atlantique Nord est difficile à estimer sans l'utilisation de modèle. Une approche possible sur cette question est d'utiliser l'ensemble des modèles couplés du futur IPCC, en regardant simulation de contrôle et simulation "historique" 1860-2000. L'utilisation du modèle de l'IPSL à haute résolution pour l'océan (1/2 degré au lieu de 2) et l'atmosphère (1 degré au lieu de 2) pourra alors être envisagée pour évaluer l'importance de la résolution sur la variabilité naturelle et forcée.

Une autre approche pour distinguer variabilité naturelle et anthropique peut consister en l'analyse d'un ensemble de simulations différants par leur conditions initiales (Lohman et al. 2009). Une série de simulations océaniques forcées (ORCA05 issu de Drakkar) sur la période 1958-2008 (DFS4) sera menée avec des conditions initiales correspondant aux anomalies pentadales de Levitus sur la période 1954-1996 (utilisées précédemment dans le projet Reco). La moyenne de ces simulations correspondra à la partie forcée, l'écart de la simulation de référence à cette moyenne, à la variabilité naturelle.

D.2 L'AMO - Atlantic Multidecadal Oscillation

La circulation méridienne de retournement Atlantique (MOC) transporte d'énormes quantités de chaleur vers le nord. Ses variations multidécennales modulent le climat des continents européen, américain et africain. De plus, les changements de température de surface de la mer (SST) en Atlantique Nord associés à cette variabilité basse-fréquence sont comparables à ceux causés par le réchauffement climatique anthropique au cours du 20ème siècle. Ainsi, mieux comprendre les mécanismes gouvernant et affectant l'Oscillation Multidécennale Atlantique (AMO) est nécessaire pour améliorer la prédiction de la variabilité et du changement climatique. Malgré un nombre croissant d'études réalistes consacrées à ce mode majeur de variabilité, expliquant 40% de la variance totale de SST en Atlantique Nord sur la période 1870-2005 (Delworth 2007), de nombreuses questions restent en suspens, en particulier liées au rôle des interactions océan-atmosphère, de l'état moyen climatique, et de la turbulence géostrophique océanique et atmosphérique. Etant donné les longues échelles de temps associées à cette variabilité, la nature intrinsèquement nonlinéaire du système couplé océan-atmosphère, et la grande variété de processus physiques probablement impliqués, il apparaît incontournable d'adopter une stratégie scientifique alternative aux études réalistes, basée sur l'utilisation d'une hiérarchie de modèles. Le bénéfice d'une telle approche réside dans sa capacité à explorer de manière efficace la sensibilité du système couplé à divers processus physiques d'échelles multiples et sur une large gamme de forçages et de paramètres.

a) Développement du modèle couplé NEMO-SPEEDY

Le modèle océanique NEMO (ORCA2) sera couplé au modèle atmosphérique SPEEDY (Simplified Parametrization, primitivE-Equation Dynamics), développé à l'ICTP (Trieste, Italie) par Molteni (2003). Il contraste fortement avec ceux généralement utilisés dans les modèles de complexité intermédiaire existants : ces derniers, plus simples, sont soit quasi-géostrophiques (ECBILT, MoBidiC), statistique-dynamiques avec des profils verticaux imposés de température et d'humidité (CLIMBER-2, CLIMBER-3 α), ou en équilibre d'énergie et d'humidité (EMBM) avec une dynamique géostrophique semi-prescrite (Uvic). L'intérêt d'utiliser un tel modèle atmosphérique PE est de mieux capturer les interactions océan-atmosphère tropicales et extra-tropicales en lien avec le cycle hydrologique et la variabilité synoptique atmosphérique. Surtout, il requiert au moins un ordre de grandeur de CPU de moins que les modèles atmosphériques de circulation générale (AGCM) à la même résolution horizontale (12' de CPU P4 3GHz pour 1 an en monoprocesseur) et permet par conséquent des intégrations numériques sur de longues échelles de temps, un avantage mis au profit de l'étude de variabilité décennale à multidécennale. Ce nouveau modèle couplé, à coût calcul réduit, offrira une opportunité unique d'explorer de manière systématique la sensibilité de la variabilité simulée à divers processus physiques et dans un espace de paramètres plus large que celui permis par les modèles couplés de circulation générale.

Nous utiliserons la version parallélisée de SPEEDY qui est actuellement en finalisation de développement aux Pays-Bas, et qui sera mise à disposition début 2010 (comm. pers. H. Renssen, VUA). La phase de développement du couplage entre NEMO et SPEEDY s'appuiera en partie sur le support technique du LPO (N. Grima, C. Talandier). Des interactions seront engagées avec le LOCEAN (S. Masson) et le CERFACS, à l'origine du développement du coupleur océan-atmosphère OASIS.

b) Rôle de l'état moyen

Une meilleure compréhension de l'origine des différences entre les modèles réalistes d'une part, et entre les modèles et les observations d'autre part, passe par une meilleure

compréhension du rôle de l'état moyen dans la variabilité. Les études antérieures réalisées avec des modèles idéalisés purement océaniques (dynamique planétaire géostrophique) et dépourvus de glace de mer ont montré que des oscillations interdécennales de la MOC n'apparaissent que lorsque l'intensité moyenne de la MOC est relativement élevée. La robustesse de ce comportement sera évaluée dans des modèles purement océaniques et couplés océan-atmosphère de complexité croissante, incluant une composante de glace de mer. Afin d'améliorer l'interprétation des observations paléoclimatiques et de mieux appréhender les changements futurs, il semble également important de déterminer les conditions climatiques optimales soutenant ce mode de variabilité basse-fréquence. Il s'agira de déterminer si ce mode majeur de variabilité se développe plus facilement dans des climats chauds ou froids. Ces aspects pourront être étudiés dans un premier temps avec le modèle "sur étagère" UVic (océan MOM2 + atmosphère *Energy Moisture Balance Model* + glace) en géométrie idéalisée (2 hémisphères + ACC, fond plat) et globale, avant de considérer des configurations globales incluant une dynamique atmosphérique plus complexe, basée sur les équations primitives (NEMO ORCA2– SPEEDY). Le rôle des interactions océan-atmosphère dans ces modèles couplés sera systématiquement évalué en diagnostiquant le bilan d'énergie potentielle disponible, selon la méthodologie développée par Arzel et al. (2006), et sur la base d'expériences de sensibilité en suivant la stratégie d'analyse proposée par Delworth et Greatbatch (2000). Il s'agira en particulier de déterminer si le rôle amortisseur du cycle hydrologique démontré par Arzel et al. (2007) dans un modèle couplé idéalisé est robuste.

c) Influence de la nonlinéarité de l'équation d'état et des conditions aux limites sur TS selon la résolution

Deux types de conditions aux limites pour la SST et SSS sont couramment utilisés dans les modèles purement océaniques : les conditions mixtes (rappel sur SST et flux E-P constant) et les conditions de flux constants de chaleur et d'eau douce. Sur la base de simulations réalisées avec un modèle purement océanique à basse résolution et utilisant une équation d'état linéaire, Arzel et al. (2006) ont démontré que les sources d'énergie de la variabilité interdécennale de la MOC sous ces deux conditions aux limites diffèrent fondamentalement : alors que la variabilité sous flux constant est soutenue par une instabilité barocline de grande échelle du courant de bord ouest (Colin de Verdière et Huck, 1999), la variabilité sous conditions mixtes est soutenue par une rétroaction positive entre la convection et le flux de chaleur de surface.

Contrairement à la variabilité sous flux constants, le sel semble jouer un rôle crucial dans la variabilité interdécennale simulée par les modèles couples réalistes et sous conditions mixtes. Pourtant, la structure de la variabilité simulée par les modèles réalistes est en meilleur accord avec celle simulée sous flux constant (te Raa et al. 2004). Il est ainsi possible que la sous-estimation du rôle du sel sous flux constant dans les études antérieures soit due à l'utilisation d'une équation d'état linéaire. Le premier objectif sera de déterminer l'impact de la nonlinéarité de l'équation d'état sous flux constants, mais également sous conditions mixtes, et de comparer les résultats à ceux obtenus avec une équation d'état linéaire.

La résolution trop basse des modèles océaniques ne permet pas de résoudre les courants de bords et les tourbillons océaniques méso-échelles, processus majeurs contrôlant le transport de chaleur et de sel. Les études antérieures consacrées à l'impact de la résolution sur la variabilité interdécennale de la MOC ont révélé que (1) le mécanisme de variabilité sous flux de chaleur constant est identique à celui obtenu à basse résolution (Huck et al., 2001) et (2) l'existence d'un mode de variabilité basse-fréquence contrôlé par la circulation forcée par le vent lorsqu'une condition de rappel sur la SST est utilisée (Spall

2008), un mode de variabilité absent à basse résolution. Afin de compléter ces études négligeant délibérément le rôle du sel, des simulations purement océaniques utilisant une résolution horizontale croissante seront menées pour étudier l'influence des conditions aux limites (mixtes, flux constant) sur la SST et la SSS.

Ces travaux, liés à l'influence de la nonlinéarité de l'équation d'état et de la résolution horizontale, se baseront en premier lieu sur des configurations à géométrie idéalisée avec le modèle MOM2, configurations similaires à celles utilisées dans les études antérieures (Colin de Verdière et Huck 1999, Huck et al. 2001, Arzel et al. 2007, Spall 2008).

d) Rôle des interactions air-mer à l'échelle de la méso-échelle océanique

Finalement, le rôle du couplage océan-atmosphère à l'échelle de la turbulence de méso-échelle océanique sera examiné en détail en comparant des simulations couplées incluant ou pas une paramétrisation de l'effet de la température de surface de la mer sur le stress du vent de surface (Hogg et al., 2009). Ces auteurs ont utilisé un modèle couplé idéalisé basé sur une dynamique quasi-géostrophique pour montrer que ce type d'interaction modifie considérablement l'état moyen de la circulation forcée par le vent. L'impact de cette paramétrisation sur la variabilité interdécennale de la MOC sera évalué en comparant des simulations couplées utilisant une composante océanique à basse et haute résolution (2° et 1/4°). Cette démarche sera tout d'abord appliquée au modèle UVic dans des configurations à géométrie idéalisée et globale, puis dans un second temps, au modèle NEMO-SPEEDY utilisant les configurations ORCA 2° et ORCA 1/4°.

D.3 Variabilité de l'océan interne et forcée

a) Résonance de la réponse du Gulf Stream aux anomalies de vent

Les travaux sur les mécanismes de variabilité du Gulf Stream ont connu un renouveau important ces dernières années. En se fondant sur des travaux antérieurs consacrés au problème stationnaire (Parsons 1969, Huang et Flierl 1978, Gangopadhyay et al. 1992), Sirven (2005) a suggéré que le mécanisme d'affleurement pouvait jouer un rôle important pour expliquer la position ou les déplacements du Gulf Stream. De nombreux travaux (Cessi 1990, Chassignet 1995, etc) avaient auparavant insisté sur l'importance des tourbillons. Le courant profond de bord ouest semble aussi devoir être pris en compte (Spall 1996). Récemment, Zhang et Vallis (2007) ont souligné le fait que le chemin suivi par le Gulf Stream était probablement influencé par les forces de tension que les courants exercent dans la zone de recirculation, sur le talus continental au sud des Grand Banks.

Un modèle à deux couches et demie dont la deuxième couche peut affleurer en surface a donc été développé dans le but d'étudier le rôle et l'importance de ces différents mécanismes sur la variabilité du Gulf Stream. Ce modèle permet l'existence de tourbillons puisqu'il a une résolution de 1/6°. Enfin une paramétrisation des tensions de fond inspirée par le travail de Zhang et Vallis peut être appliquée à la couche profonde active du modèle.

Les mécanismes de variabilité interne dans ce type de modèles ont été peu étudiés (la seule étude est à notre connaissance celle de Primeau 2008 à partir d'un modèle à une couche et demie où la couche au repos peut affleurer). En se limitant à des configurations utilisant un vent réaliste issu des réanalyses ERA40, nous chercherons dans un premier temps à déterminer si ce modèle présente des pics de variabilité interne et si ces derniers sont sensibles à la paramétrisation des contraintes associées au mécanisme de Zhang et Vallis. Pour cela, des expériences longues (60 ans) avec un vent saisonnier seront effectuées et analysées.

Ce travail fait, la réponse du modèle à un forçage interannuel sera alors étudiée. Des expériences utilisant les vents issus des réanalyses ERA40 (1958-2001) seront faites pour

déterminer si les déplacements latéraux du Gulf Stream sont principalement associés à la variabilité interne du système (analysée dans l'étape précédente) ou au contraire si, comme semble le suggérer les observations (Frankignoul et al. 2001), la NAO semble primer. Dans ce cas, il faudra alors déterminer quels mécanismes sont à l'œuvre : la propagation des ondes de Rossby suffit-elle pour expliquer ces fluctuations ou les variations du courant profond de bord ouest doivent-elles être considérées ?

b) Réponse de la thermocline à un forçage variable

Les solutions autosimilaires des équations de la thermocline ont été peu étudiées (Salmon et Hollerbach 1991). Ces solutions ont encore moins été utilisées pour parvenir à mieux comprendre pourquoi la thermocline se forme et comment elle évolue au cours du temps. Sirven et al. (2009) ont cependant montré que ces modèles, à côté des modèles de thermoclines non diffusif (du type Luyten et al. 1983) pouvaient apporter des informations intéressantes sur ces questions : ils permettaient par exemple de préciser le rôle respectif des diffusions horizontales et verticales. De plus dans ces modèles, aucune contrainte a priori n'est imposée au bord est, et les solutions obtenues sont donc indépendantes d'une stratification artificiellement imposée à l'est. Jusqu'à présent, seules certaines solutions stationnaires ont été étudiées en détail.

Nous nous proposons donc de poursuivre le travail de Sirven et al. (2009) en étudiant le comportement des solutions variables. Les échelles de temps que le modèle est susceptible de représenter de façon pertinente vont de la vingtaine d'années à quelques siècles. Le modèle est suffisamment simple pour rendre possible une approche théorique où les mécanismes de variabilité peuvent être complètement élucidés. Il devrait permettre de mieux comprendre comment des changements en surface ou dans la partie nord du bassin modifie la circulation intérieure et influence l'épaisseur ou la profondeur de la thermocline.

c) Influence de la glace de mer dans la variabilité des modèles océaniques

Les modèles géostrophiques planétaires sont bien adaptés pour une étude de la variabilité de l'océan à basse fréquence : en effet, étant plus simples que les modèles en équation primitives, ils permettent des calculs analytiques plus poussés et autorisent des expériences numériques plus longues, ce qui est fondamental pour représenter la variabilité basse fréquence du climat. Trois facteurs semblent influencer de façon prépondérante sur la circulation méridienne moyenne des océans : ce sont le vent, la température et les flux d'eau douce. Leur rôle respectif est très mal compris même si, à basse fréquence les flux d'eau douce semblent cruciaux : leur variabilité semble surtout associée à la variabilité interannuelle de la glace de mer mais leur impact sur la circulation océanique moyenne reste difficile à évaluer. Pour essayer de mieux comprendre leur rôle parmi les autres acteurs du climat, un modèle géostrophique planétaire couplé à des modèles de glace de différentes complexité sera donc développé. Ce modèle sera étudié en mode forcé, l'accent étant mis sur les mécanismes agissant dans l'océan. Cette étude complètera la précédente puisqu'elle prendra en compte les courants de bord et distinguera entre anomalies de température et anomalies de salinité dans la formation des anomalies de densité.

D.4 Modes de bassin océanique – cadre linéaire

Dans le bassin Atlantique la circulation océanique peut générer spontanément une variabilité décennale par différents mécanismes, par exemple une instabilité linéaire de type barocline à grande échelle si l'on en croît des modèles océaniques en géométrie idéalisée. Des modes de bassin de période similaire existent dans des modèles encore

plus simples, de type quasi-géostrophique, basés sur la résonance des ondes de Rossby, mais ils demeurent amortis et nécessitent donc une excitation continue (par le 'bruit' atmosphérique) pour être entretenus. Tous ces travaux ayant été faits dans des bassins à fond plat, on s'intéresse ici à l'influence de la bathymétrie sur la propagation des ondes de Rossby et sur ces modes de bassin, en associant les approches observationnelles, théoriques et numériques.

a) Interactions ondes-bathymétrie

La propagation des ondes de Rossby apparaît clairement dans les observations altimétriques satellitaires, et on essaiera de mettre en évidence les modifications des caractéristiques de ces ondes associées aux variations bathymétriques. En parallèle, de manière théorique, on cherchera à bien comprendre les interactions entre les ondes de Rossby et une topographie idéalisée de type dorsale médio-atlantique, afin de rationaliser les modifications de propagation et d'amplitude des ondes au passage de la dorsale observées par satellite.

b) Modes de bassin avec topographie variable

On étendra ensuite les modèles simplifiés (de type quasi-géostrophique et shallow-water) utilisés pour les études précédentes à une profondeur variable afin de déterminer par analyse de stabilité linéaire les modes de bassin ainsi modifiés, et on cherchera à les interpréter à l'aide des résultats de la première phase. On passera alors à des bassins réalistes avec trait de côte et bathymétrie, pour avoir la signature de ces modes de bassin baroclines dans l'Atlantique.

c) Modes de bassin en configuration réaliste

A défaut de pouvoir mener une analyse de stabilité linéaire complète dans un modèle PE en configuration réaliste (pour le moment), des méthodes alternatives permettent d'obtenir le mode linéaire le moins amorti lorsqu'on dispose du modèle linéaire tangent ou adjoint (Sévellec et Fedorov, en préparation). Or c'est le cas pour le modèle OPA ORCA2 avec OPATAM (Weaver et al. 2003) et c'est dans ce cadre qu'une analyse préliminaire a été menée : le mode extrait a une période de 24 ans et une signature centrée sur le nord de l'Atlantique Nord. Son mécanisme sera décortiqué, sa signature comparée aux observations, et on essaiera d'extraire les modes équivalents dans des modèles à plus haute résolution (ORCA05) afin d'étudier la robustesse de ce mode interdécennal à la configuration modèle.

En parallèle, les analyses de stabilité linéaire classique seront reprises, dans une configuration Atlantique Nord d'un modèle shallow water à 2 couches et demie, et dans le modèle OPA en configuration ORCA2. Les problèmes posés par la région équatoriale et les modes très particuliers qui s'y développent semblent être résolus, comme le montre l'analyse du mode le moins amorti précédente. Ces analyses permettront de déterminer les caractéristiques spatiales et temporelles des modes les moins amortis et d'en comprendre les mécanismes, et de rationaliser les analyses de perturbations optimales menées jusqu'à présent (Sévellec et al. 2008).

d) Perturbations et variabilités optimales de la circulation océanique

La dynamique océanique, comme beaucoup d'écoulements géophysiques, est a priori non-normale, c'est à dire que sa sensibilité à une perturbation est différente de la réponse qu'elle induit. Cette propriété accroît sa capacité à générer de la variabilité en réponse à une perturbation. Un des outils développés pour étudier ce phénomène est l'analyse de stabilité généralisée (Farrell et Ioannou 1996). Cette technique permet d'obtenir les perturbations dites optimales, c'est-à-dire les perturbations induisant le plus de changements/variabilités du système. Sévellec et al. (2007) ont développé une technique

particulièrement efficace permettant de mettre en place ces analyses pour un faible coût numérique. Ceci rend possible ce type d'analyses dans des OGCMs en configuration réaliste (Sevellec et al., 2008) par intégration du modèle adjoint. Ces analyses adjointes fonctionnent, par définition de l'adjoint, sur un principe de causalité. Elles sont donc capables de décrire la chaîne d'évènements induisant tel ou tel changement de la dynamique océanique. Dans notre futur travail nous nous proposons d'appliquer cette technique au modèle océanique OPA (Madec et al. 1998) en configuration ORCA2 (Madec et Imbard 1996), pour estimer comment les flux de surface océanique (de chaleur comme de moment cinétique) sont capables d'engendrer de la variabilité océanique. Ainsi nous essayerons de comprendre comment les perturbations atmosphériques sont capables de modifier le transport méridien de chaleur ou l'intensité de la cellule de retournement, mais aussi comment ces perturbations sont capables de stimuler le mode de variabilité statistique principal de la circulation océanique. Une attention particulière sera portée aux conditions limites (océan forcé vs. couplage océan-atmosphère) puisque celui-ci a un impact important sur la sensibilité de la circulation et de sa variabilité (comme montré dans un cadre forcé idéalisé par Sévellec et al., 2009). Notre travail s'intéressera aussi à caractériser, dans un contexte non-autonome, la période de la saison la plus propice à la croissance de perturbations.

M - Périodes centenaires et millénaires

M.1 Equilibres multiples et oscillations millénaires

Des intégrations multi-millénaires de modèles couplés océan-glace-atmosphère seront menées à partir de différents états initiaux afin d'étudier l'existence et les bassins d'attraction des équilibres possibles (Manabe et Stouffer 1988), et de déterminer les régimes d'oscillations centenaires et millénaires. Plusieurs modèles seront utilisés à cette fin, afin de vérifier la robustesse des résultats au modèle : UVic (MOM2+EMBM+glace sur la même grille horizontale), et ORCA2LIM+SPEEDY (coupleur Oasis) quand il sera disponible. La longueur maximale des intégrations dépendra du modèle : en géométrie globale réaliste, le modèle couplé UVic (basse résolution) intègre 500 ans par jour, le modèle océan-glace ORCA2LIM 60 ans par jour et le modèle SPEEDY 120 ans par jour, ORCA05 10 ans par jour (sur le calculateur régional d'Ifremer avec un nombre de processeur adéquat).

M.2 Les oscillations centenaires comme précurseurs des millénaires

Dans un modèle 2D latitude-profondeur de la THC, on a pu étudier les régimes de paramètres conduisant à des oscillations centenaires (Sevellec et al. 2006) et d'autres conduisant à des oscillations millénaires (Colin de Verdière et al. 2006). Les mécanismes responsables de ces oscillations suggèrent des relations entre les 2, qui seront étudiées dans les modèles océaniques 2D avant d'être validées dans des modèles 3D (idéalisées d'abord), avant d'essayer de les reproduire dans des modèles couplés idéalisés.

M.3 Régularité de l'oscillation millénaire

Les données paléoclimatiques du dernier âge glaciaire montrent l'occurrence d'une variabilité millénaire, dont la régularité à 1500 ans est objet de débat (Alley 2001, Rahmstorf 2003, Ditlevsen et al. 2005 2007). Timmermann et al. (2003) suggèrent une combinaison de mode oscillatoire et de fluctuations aléatoires, où l'amplitude du bruit atmosphérique détermine la longueur du stadial, et la longueur de l'interstadial est contrôlée par des processus déterministes linéaires et non-linéaires : les oscillations

perdent alors en régularité lorsque l'amplitude du bruit augmente, même dans des modèles en boîtes. Ces oscillations, appelées oscillations de Dansgaard-Oeschger (ODO), sont vraisemblablement associées à des changements de la cellule de retournement de l'Atlantique (Broecker et al. 1990). Elles induisent de forts changements du transport de chaleur et peuvent donc être responsables de modifications du climat autour de l'Atlantique Nord. La reproduction de ces oscillations par des modèles numériques apparaît comme très régulière alors qu'elles ne le sont pas particulièrement dans les données. Ainsi les modèles idéalisés, écrits pour représenter les ODO de ces modèles, ont peut-être des dimensions dynamiques trop faibles (2 pour Colin de Verdière 2007, comme pour Sakai et Peltier 1999). Cette dimension dynamique faible induit une perte de la dépendance à la condition initiale et donc une partie de leur utilité pour la prévision du climat. Nous nous proposons d'introduire dans ces modèles idéalisés une dimension dynamique plus élevée, afin de mieux représenter l'irrégularité de cette oscillation et de sa dynamique chaotique. Une meilleure compréhension et représentation des oscillations millénaires, nous permettra de construire un indice ou précurseur des changements de phase de celles-ci. Une hiérarchie de modèles 3D plus ou moins idéalisés sera utilisée pour généraliser les résultats obtenus précédemment.

S - Stabilité de la circulation thermohaline (THC)

S.1 Stabilité de la THC et augmentation des gaz à effets de serre

Les variations du climat soumis à une augmentation du CO₂ sont couramment étudiées avec les modèles réalistes de dernière génération. Si les premières simulations penchaient pour un affaiblissement de la circulation thermohaline (THC), son futur dans les simulations récentes semble assez dépendant du modèle. Des modèles océaniques couplés très simplifiés mais incorporant les effets à l'ordre zéro de l'atmosphère et de la glace de mer, suggèrent que la THC est en effet soumise à au moins deux effets contradictoires lors d'un réchauffement du climat. Un effet « eau douce » affaiblissant causé par la fonte des glaciers polaires et un effet radiatif stabilisateur causé par l'augmentation de la SST aux basses et moyennes latitudes de l'Atlantique Nord. Il est possible que les modèles réalistes soient alors sous l'influence prédominante de l'un ou de l'autre effet. L'objectif est donc de quantifier ces deux effets sur la stabilité de la THC dans des modèles de complexité croissante. Différents modèles océaniques et couplés à des résolutions variables seront utilisés à cet effet. Néanmoins, il faut reconnaître l'extrême difficulté de prédiction des changements du cycle hydrologique dans l'atmosphère et peut-être la résolution nécessaire aux modèles atmosphériques pour converger sur ce point est-elle simplement inabordable.

S.2 Influence de la résolution sur la stabilité de la THC

La stabilité de la MOC dans les modèles océaniques réalistes forcés est particulièrement sensible à la résolution horizontale (Marsh et al. 2009). Dans le cadre du réchauffement climatique actuel, la fonte du Groenland s'accompagne d'un apport d'eau douce supplémentaire dans les courants de bord. Or ceux-ci sont très mal représentés à basse résolution. L'influence de ces eaux douces, leur mélange et leur impact sur la formation d'eau profonde en Mer d'Irmingier et du Labrador, semble donc extrêmement sensible à la résolution des modèles océaniques utilisés. Des expériences identiques seront menées avec différentes configurations du modèle NEMO (ORCA 2, 1/2°, 1/4°) afin de comprendre de quelle manière la résolution influence la réponse à des apports d'eau douce.

Références

- Alley, R. B. et al., 2001: Stochastic resonance in the North Atlantic, *Paleoceanogr.*, 16, 190-198.
- Arzel, O., T. Huck, A. Colin de Verdière, 2006: The different nature of interdecadal variability of the thermohaline circulation under mixed and flux boundary conditions. *J. Phys. Oceanogr.*, 36, 1703-1718.
- Arzel, O., A. Colin de Verdière, T. Huck, 2007: On the origin of interdecadal oscillations in a coupled ocean-atmosphere model. *Tellus*, 59, 367-383.
- Barnett, T. P., D. W. Pierce, K. M. AchutaRao, P. J. Gleckler, B. D. Santer, J. M. Gregory, W. M. Washington, 2005: Penetration of Human-Induced Warming into the World's Oceans. *Science*, 309, 284-287.
- Broecker, W. S., et al., 1990: A salt oscillator in the glacial Atlantic? 1. The concept. *Paleoceanography*, 5, 469-477.
- Cessi, P., 1990: Recirculation and separation of boundary currents. *J. Mar. Res.*, 48, 1-35.
- Chassignet, E. P., 1995: Vorticity dissipation by western boundary current in the presence of outcropping layers. *J. Phys. Oceanogr.*, 25, 242-255.
- Colin de Verdière, A., T. Huck, 1999: Baroclinic instability: An oceanic wavemaker for interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 893-910.
- Colin de Verdière, A., M. Ben Jelloul, F. Sévellec, 2006: Bifurcation structure of thermohaline millennial oscillation. *J. Clim.*, 19, 5777-5795.
- Colin de Verdière, A., 2007: A simple model of millennial oscillations of the thermohaline circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 1142-1155.
- Delworth, T. L., R. J. Greatbatch, 2000: Multidecadal thermohaline circulation variability excited by atmospheric surface flux forcing. *J. Clim.*, 13, 1481-1495.
- Delworth, T. L., R. Zhang, M. E. Mann, 2007: Decadal to centennial variability of the Atlantic from observations and models. In: *Geophysical Monograph, Ocean circulation: Mechanisms and Impacts*, 173, 131-148.
- Ditlevsen, P. et al., 2007: The DO-climate events are probably noise-induced: statistical investigation of the climatic 1470 years cycle. *Clim. Past*, 3, 129-134.
- Ditlevsen, P. et al., 2005: The Recurrence Time of Dansgaard-Oeschger Events and Limits on the Possible Periodic Component, *J. Clim.*, 18, 2594-2603.
- Farrell, B. F., P. J. Ioannou, 1996: Generalized stability theory. Part I: autonomous operators. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2025-2040.
- Farrell, B. F., P. J. Ioannou, 1996: Generalized stability theory. Part II: nonautonomous operators. *J. Atmos. Sci.*, 53, 2041-2053.
- Frankignoul, C., G. de Coetlogon, T. M. Joyce, S. Dong, 2001: Gulf Stream variability and ocean-atmosphere interactions. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 3516-3529.
- Gangopadhyay, A., P. Cornillon, and D. R. Watts, 1992: A test of the Parsons-Veronis hypothesis on the separation of the Gulf-Stream. *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1286-1301.
- Held, I. M., 2005: The gap between simulation and understanding in climate modeling. *BAMS*, 86, 1609-1614.
- Herbaut, C., J. Sirven, S. Février, 2002: Response of a Simplified Oceanic General Circulation Model to Idealized NAO-like Stochastic Forcing. *JPO*, 32, 3182-3192.
- Hogg, A. M., W. K. Dewar, P. Berloff, S. Kravtsov, D. K. Hutchinson, 2009: The effects of mesoscale ocean-atmosphere coupling on the large-scale ocean circulation, *J. Clim.*, 22, 4066-4082.
- Huang, R. X., and G. R. Flierl, 1987: Two-layer Models for the Thermocline and Current Structure in Subtropical/Subpolar Gyres. *JPO*, 17, 872-884.
- Huck, T., G. Vallis, A. Colin de Verdière, 2001: On the robustness of the interdecadal modes of the thermohaline circulation. *J. Clim.*, 14, 940-963.
- Lohmann, K., H. Drange, M. Bentsen, 2009: A possible mechanism for the strong weakening of the North Atlantic subpolar gyre in the mid-1990s. *GRL*, 36, L15602, doi:10.1029/2009GL039166.
- Luyten, J. R., Pedlosky J., H. Stommel, 1983: The ventilated thermocline, *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 292-309.
- Madec, G., M. Imbard, 1996: A global ocean mesh to overcome the North Pole singularity. *Clim. Dyn.*, 12, 381-388.
- Madec, G., et al., 1998: OPA 8.1 Ocean General Circulation Model reference manual. Tech. rep., Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No11, 91pp.

- Manabe, S., R. J. Stouffer, 1988: Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *J. Clim.*, 1, 841-866.
- Marsh, R., B. A. de Cuevas, A. C. Coward, J. Jacquin, J. J.-M. Hirschi, Y. Aksenov, A. J. G. Nurser, S. A. Josey, 2009: Recent changes in the North Atlantic circulation simulated with eddy-permitting and eddy-resolving ocean models. *Ocean Modelling*, 28, 226-239.
- Molteni, F., 2003: Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I. Model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Clim. Dyn.*, 20, 175-191.
- Nof, D., 2008: Simple versus complex climate modeling. *EOS*, 89, 52, 544-545.
- Parsons, A. T., 1969: A two-layer model of Gulf Stream separation. *JFM*, 39, 511-528.
- Rahmstorf, S., 2003: Timing of abrupt climate change: A precise clock. *GRL*, 30, 10, doi: 10.1029/2003GL017115.
- Sakai, K., W. R. Peltier, 1999: A dynamical system model of the Dansgaard–Oeschger oscillations and the origin of the Bond cycle. *J. Climate*, 12, 2238–2255.
- Salmon, R., R. Hollerbach, 1991: Similarity solutions of the thermocline. *J. Mar. Res.*, 49, 249-280.
- Sévellec, F., T. Huck, M. Ben Jelloul, 2006: On the mechanism of centennial thermohaline oscillations. *Journal of Marine Research*, 64, 355-392.
- Sévellec, F., M. Ben Jelloul, et T. Huck, 2007: Optimal surface salinity perturbations influencing the thermohaline circulation. *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 2789–2808.
- Sévellec, F., et al., 2008: Optimal surface salinity perturbations of the meridional overturning and heat transport in a global ocean general circulation model. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 2739–2754.
- Sévellec, F., et al., 2009: Non-normal multidecadal response of the thermohaline circulation induced by optimal surface salinity perturbations. *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 852–872.
- Sirven, J., 2005: Response of the separated western boundary current to harmonic and stochastic wind stress variations in a 1.5 layer ocean model. *JPO*, 35, 1341-1358.
- Sirven, J., S. Février, and C. Herbaut, 2009: A two-gyre ocean model based on similarity solutions. *J. Phys. Oceanogr.*, sous presse.
- Spall, M. A., 1996a: Dynamics of the Gulf Stream/ deep western boundary current crossover. Part I: Entrainment and recirculation. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2152-2168.
- Spall, M. A., 1996b: Dynamics of the Gulf Stream/ deep western boundary current crossover. Part II: Low frequency internal oscillations. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 2169-2182.
- Spall, M. A., 2008: Low-frequency interaction between horizontal and overturning gyres in the ocean. *Geophys. Res. Letters*, 35, doi:10.1029/2008GL035206.
- te Raa, L. A., J. Gerrits, H. A. Dijkstra, 2004: Identification of the mechanism of interdecadal variability in the North Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 2792-2807.
- Timmermann, A. et al., 2003: Coherent resonant millennial-scale climate oscillations triggered by massive meltwater pulses. *J. Clim.*, 16, 2569-2585.
- Weaver, A. T., J. Vialard, D. L. T. Anderson, 2003: Three- and four-dimensional variational assimilation with a general circulation model of the tropical Pacific Ocean. Part 1: formulation, internal diagnostics and consistency checks. *MWR*, 131, 1360-1378.
- Zhang, R., 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. *JPO*, 37, 2053-2080.

Calendrier de réalisation

	2010	2011	2012
(multi)Décennal	D1-D2a-D3a-D4ad	D1-D2b-D3b-D4bd	D2-D3c-D4c
Millénaire	M1-M2	M1-M3	
Stabilité		S1-S2	S1-S2

Résultats attendus

- des réunions de travail régulières (en partant sur une base annuelle) entre participants et collaborateurs nous permettant des mises à jour sur l'avancée des recherches et le développement des outils, et des échanges d'idées sur les résultats et l'évolution du projet.
- des publications sur les différentes questions abordées :
 - détermination des caractéristiques de la variabilité multidécennale de l'Atlantique.
 - distinction du signal anthropique de la variabilité naturelle.
 - compréhension des mécanismes de variabilité dominants dans l'Atlantique Nord (décennal, multidécennal, millénaire).

Moyens nécessaires à la réalisation du projet

- Equipements disponibles
 - stations de travail en local, calculateurs multiprocesseurs locaux
- Fonctionnement : total 5800€/an
 - publications : LPO 1/an = 2000€/an ; LOCEAN : 1000€/an ; total 3000€/an
 - financement de stage : LPO 4mois*400€/m = 1600€/an ; LOCEAN : 1200€/an ; total 2800€/an
- Missions : total 9200€/an
 - réunions projet : LPO 3pers*400€=1200€/an ; LOCEAN : 3pers=1200€/an ; LSCE : 2pers=800€/an ; total 3200€/an
 - colloque : LPO 3pers*1500€=4500€/an ; LOCEAN: 1pers=1500€/an ; total 6000€/an (à redistribuer entre LOCEAN LPO LSCE selon besoins)
- Petit équipement : total 3000€/an
 - informatique (PC, portable, disque stockage) : LPO 2000€/an ; LOCEAN 500€/an; LSCE 500€/an ; total 3000€/an
- Demandes de label pour moyens complémentaires
 - temps calcul sur la machine régionale ifremer : 400.000 heures par an
 - temps calcul à l'IDRIS (à préciser avec LOCEAN et LSCE)
 - financement de stages M2 (2/an, alternativement pour LOCEAN LPO LSCE)

Co-financements acquis ou soumis (hors INSU)

- bourse de thèse MERT (Ecole Doctorale des Sciences de la Mer, IUEM, Brest) : Dhouha Ferjani, encadrement A. Colin de Verdière et T. Huck, 11/2009-11/2012.

Valorisation des travaux antérieurs

Références bibliographiques de l'équipe 2006-2009

- Alkama, R., M. Kageyama, G. Ramstein, O. Marti, P. Ribstein, D. Swingedouw, 2008: Impact of a realistic river routing in coupled ocean-atmosphere simulations of the Last Glacial Maximum climate. CD, 30, 7-8, 855-869 .

- Arzel, O., T. Huck, A. Colin de Verdière, 2006: The different nature of the interdecadal variability of the thermohaline circulation under mixed and flux boundary conditions. *Journal of Physical Oceanography*, **36**, 1703-1718.
- Arzel, O., A. Colin de Verdière, T. Huck, 2007: On the origin of interdecadal oscillations in a coupled ocean-atmosphere model. *Tellus A*, **59**, 367-383.
- Arzel, O., M. H. England, W. P. Sijp, 2008: Reduced stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation due to wind-stress feedback during glacial times. *JC*, **21**, 6260-6282.
- Cabanes, C., T. Huck, A. Colin de Verdière, 2006: Contributions of wind forcing and surface heating to interannual sea level variations in the Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, **36**, 1739-1750.
- Colin de Verdière, A., M. Ben Jelloul, F. Sévellec, 2006: Bifurcation structure of thermohaline millennial oscillation. *J. Clim.*, **19**, 5777-5795.
- Colin de Verdière, A., 2007: A simple model of millennial oscillations of the thermohaline circulation. *JPO*, **37**, 1142-1155.
- Colin de Verdière, A., 2009: Keeping the Freedom to Build Idealized Climate Models. *EOS*. **90**, 26, 224.
- Colin de Verdière, A., L. te Raa, 2009: Weak oceanic heat transport as a cause of the instability of glacial climates. *Clim. Dyn.*, doi: 10.1007/s00382-009-0675-8, in press.
- Février, S., J. Sirven, C. Herbaut, 2007: Interaction of a coastal Kelvin wave with the mean state in the Gulf Stream separation area. *JPO*, **37**, 1429-1444.
- Goosse, H., O. Arzel, J. Luterbacher, M. E. Mann, H. Renssen, N. Riedwyl, A. Timmermann, E. Xoplaki, and H. Wanner, 2006: The origin of the European "Medieval Warm Period". *Climate of the Past*, **2**, 99-113.
- Herbaut, C., M.N. Houssais, J. Sirven, 2006: Impact of the Northern annular mode on the freshwater exchange between the Arctic and the North Atlantic. *DSR*, **53**, 3, 474-484.
- Herbaut, C.; Sirven, J.; Deshayes, J., 2006: Sensitivity of the meridional transport in a 1.5-layer ocean model to localized mass sources. *JMR*, **64**, 6, 819-833.
- Herbaut, C.; Houssais, M.-N., 2009: Response of the eastern North Atlantic subpolar gyre to the North Atlantic Oscillation. *GRL*, **36**, 17, L17607, doi:10.1029/2009GL03909.
- Huck, T., A. Colin de Verdière, P. Estrade, R. Schopp, 2008: Low-frequency variations of the large-scale ocean circulation and heat transport in the North Atlantic from 1955-1998 in-situ temperature and salinity data. *Geophysical Research Letter*, **35**, L23613, doi:10.1029/2008GL035635.
- Salas y Mélia, D., C. Genthon, O. Arzel, C. Cassou, V. Guemas, G. Krinner, M. Minvielle, D. Swingedouw, 2009: Régions polaires, cryosphère et circulation thermohaline. Que nous ont appris les simulations du 4e rapport d'évaluation du Giec ? *La Météorologie*, **56**, 33-39.
- Sévellec, F., T. Huck, M. Ben Jelloul, 2006: On the mechanism of centennial thermohaline oscillations. *Journal of Marine Research*, **64**, 355-392.
- Sévellec, F., M. Ben Jelloul, T. Huck, 2007: Optimal surface salinity perturbation influencing the thermohaline circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **37**, 2789-2808.
- Sévellec, F., T. Huck, M. Ben Jelloul, N. Grima, J. Vialard, A. Weaver, 2008: Optimal surface salinity perturbations of the meridional overturning and heat transport in a global ocean general circulation model. *Journal of Physical Oceanography*, **38**, 2739-2754.
- Sévellec, F., T. Huck, M. Ben Jelloul, J. Vialard, 2009: Non-normal multidecadal response of the thermohaline circulation induced by optimal surface salinity perturbations. *Journal of Physical Oceanography*, **39**, 4, 852-872.
- Sirven, J., C. Herbaut, J. Deshayes, C. Frankignoul, 2007: Origin of the annual to decadal peaks of variability in the response of simple ocean models to stochastic forcing. *JPO*, **37**, 2146-2157.

- Swingedouw, D., 2006: Origine et impact climatique d'un changement de circulation thermohaline au cours des prochains siècles dans le modèle IPSL-CM4. PhD thesis manuscript, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, France, 190pp.
- Swingedouw, D.; Braconnot, P.; Marti, O., 2006: Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. GRL, 33, 7, L07711, doi:10.1029/2006GL025765.
- Swingedouw D., Bopp L., Matras A. and Braconnot P., 2007: Effect of land-ice melting and associated changes in the AMOC result in little overall impact on oceanic CO2 uptake. Geophysical Research Letters, 34, L23706.
- Swingedouw D. and Braconnot P., 2007: Effect of Greenland ice-sheet melting on the response and stability of the AMOC in the next centuries. In: AGU monograph "Ocean Circulation: Mechanisms and Impacts" by Schmittner A., Chiang J. and Hemming S., 383-392.
- Swingedouw D., Braconnot P., Delecluse P., Guilyardi E., Marti O., 2007: The impact of global freshwater forcing on the thermohaline circulation: adjustment of North Atlantic convection sites in a CGCM. Climate Dynamics, 28, 291-305.
- Swingedouw, D., P. Braconnot, P. Delecluse, E. Guilyardi, O. Marti, 2007: Quantifying the AMOC feedbacks during a 2×CO2 stabilization experiment with land-ice melting. CD, 29, 5, 521-534.
- Swingedouw, D., T. Fichefet, P. Huybrechts, H. Goosse, E. Driesschaert, M.-F. Loutre, 2008: Antarctic ice-sheet melting provides negative feedbacks on future climate warming. GRL, 35, L17705, doi:10.1029/2008GL034410.
- Swingedouw D., Fichefet T., Goosse H., Loutre M. F., 2009: Impact of transient freshwater releases in the Southern Ocean on the AMOC and climate. Climate Dynamics, 33, 365-381.

Liste des contrats obtenus au cours des quatre dernières années

- titre du projet / programme / année / crédits obtenus / résumés des principaux résultats / liste des publications / base de données et accès
- RECO / LEFE EVE / 2006-2008 / 13900€ / Huck et al. 2008 GRL ; Cabanes et al. GRL soumis.

Compléments

Il appartiendra aux demandeurs de donner ici tout complément d'information utile à l'évaluation du projet, notamment l'analyse des risques associés au projet.

Le couplage du modèle SPEEDY avec ORCA2 présente un certain risque, pas tellement du point de vue technique, mais du fait que les résultats du modèle couplé final sont difficilement prévisibles. En effet la climatologie moyenne devra être validée, et si elle ne donne pas satisfaction, la phase d'ajustement des paramètres risque de ne pas être triviale : il n'y a pas d'algorithme pour régler un modèle couplé.

L'analyse de simulations couplées libres ne fournira pas nécessairement des oscillations analogues aux oscillations observées (pour ce que l'on peut savoir de l'AMO sur une seule période instrumentale...). Néanmoins le progrès viendra de la confrontation de modes existants dans les modèles (numériques et théoriques) et des observations.