

PROGRAMME NATIONAL d'ETUDE DU CLIMAT

DEMANDE DE FINANCEMENT 2005 - formulaire détaillé

Rappel : *une demande de financement comprend la fiche abrégée et le formulaire détaillé*

La demande de financement doit parvenir par courrier électronique. L'envoyer en format RTF ou PDF, en document attaché, à : martine.revillon@cnrs-dir.fr. Le document attaché doit être nommé avec les informations minimum suivantes : PNEDC-nom du responsable scientifique. **N.B. Un exemplaire signé par le directeur de laboratoire doit parvenir par courrier postal** à Martine Révillon INSU -BP 287-16-75766 Paris cedex 16

THEME CONCERNÉ : Thème 1 "Le climat de l'Europe et du bassin Méditerranéen et leurs liens avec le bassin Atlantique Nord et le bassin arctique"

RESPONSABLES SCIENTIFIQUES DU PROJET : Thierry Huck (CR CNRS), Mahdi Ben Jelloul (MdC UBO), Alain Colin de Verdière (prof. UBO), Fabio d'Andrea (CR CNRS)
+ bilan : Gaëlle de Coëtlogon (MdC CETP), Claude Frankignoul (prof. UPMC), Jérôme Sirven (MdC UPMC)

LABORATOIRE DU PROPOSANT : directeur Xavier Carton

Laboratoire de Physique des Océans (UMR 6523 CNRS / IFREMER / UBO)
Université de Bretagne Occidentale, UFR Sciences F308, 6 avenue Le Gorgeu
CS 93837, 29238 Brest Cedex 3
Tel. : 02 98 01 65 10 - Fax : 02 98 01 64 68 – Email : thuck@univ-brest.fr

Titre du projet : VARIABILITÉ DÉCENNALE DANS L'ATLANTIQUE NORD

Résumé du projet :

Observations et modèles exhibent des modes de variabilité de périodes interannuelles à interdécennales sur l'Atlantique Nord, le plus important étant la NAO. Notre démarche pour analyser, comprendre et prévoir cette variabilité s'articule autour des questions scientifiques suivantes :

1. Quelle est la réponse océanique, notamment du Gulf Stream, aux changements de la circulation atmosphérique et ses mécanismes ?
2. Quelle est la réponse atmosphériques aux modifications de la circulation océanique (SST, transport de chaleur, ré-émergence d'anomalies de température) et ses mécanismes (linéaire, transitoire) ?
3. Existe-t'il des modes de variabilité naturelle de l'océan ou du système couplé ? quels sont leurs mécanismes conceptuels et leur signature dans des configurations réalistes ?

Liste des personnes collaborant au projet, laboratoire, statut, % du temps dédié au projet

Fabio d'Andrea	LMD	CR CNRS	40%
Olivier Arzel	UCL, Louvain	postdoc	25%
Mahdi Ben Jelloul	LPO	MdC UBO	25%
Cécile Cabanes	JPL, Pasadena	Postdoc	20%
Alain Colin de Verdière	LPO	Professeur UBO	30%
Thierry Huck	LPO	CR CNRS	50%
Guillaume Maze	LPO	Doctorant UBO	100%
Florian Sévellec	LPO	Doctorant UBO	100%
Lianke te Raa	IMAU, Utrecht	Postdoc	30%
Jérôme Vialard	LODYC	CR IRD	consultant

Durée du contrat demandé : dernière année

Montant demandé cette année : 14600 euro

Projet-nouveau

Projet déjà engagé : OUI

Visa *obligatoire* du Directeur de formation :
Xavier Carton

Signature du demandeur :
Thierry Huck

DOSSIER SCIENTIFIQUE

I. Intérêt scientifique

Des modes de variabilité basse fréquence océan-atmosphère ont été mis en évidence dans les observations comme dans les intégrations avec des modèles de circulation générale (GCM) couplés océan-atmosphère. Dans l'Atlantique Nord, ces modes font principalement intervenir l'oscillation nord-atlantique (NAO), la couche superficielle océanique et l'ajustement des gyres subtropicale et subpolaire aux changements du vent et des flux de flottabilité. Il est difficile d'identifier dans les observations les rôles respectifs de l'océan et de l'atmosphère dans ces modes de variabilité, et c'est là un avantage primordial des modèles que de pouvoir découpler les deux milieux : ainsi des modes de variabilité interannuels à interdécennaux apparaissent spontanément dans des modèles océaniques (atmosphériques) sous forçage atmosphérique (océanique) constant.

Une voie efficace pour la compréhension et la maîtrise des phénomènes nord-atlantiques (océan et atmosphère) consiste à utiliser une hiérarchie de modèles pour effectuer conjointement des simulations forcées, couplées ou partiellement couplées. C'est ainsi que nous présentons ce projet d'études afin de comprendre les rôles respectifs de l'océan nord-atlantique et de l'atmosphère dans les variations du climat en Europe.

1. L'intensité du couplage océan-atmosphère varie d'un modèle à l'autre, l'océan répondant de manière principalement passive à l'échelle décennale au forçage atmosphérique dans certains GCM couplés (ECHAM1/LSG et plus encore GFDL), tandis qu'il semble jouer un rôle actif dans d'autres (HOPE ou Hadley Centre). Les modes décennaux, qu'ils reflètent une réponse active ou passive de l'océan au forçage atmosphérique, font intervenir la réponse de l'intérieur de l'océan au forçage atmosphérique et on cherchera à mieux comprendre les mécanismes de cette réponse à l'aide d'une hiérarchie de modèles océaniques forcés par des structures de vent et de flottabilité plus ou moins idéalisées. Par exemple, une analyse de la position du Gulf Stream a montré qu'un déplacement de son axe vers le nord correspondait à une NAO positive. Le déphasage entre forçage et réponse est compris entre 1 et 7 ans (Frankignoul et al. 2001). En fait, à cause des valeurs positives de la NAO durant ces dernières décennies, le Gulf Stream se trouvait dans les années 90 de 50 à 100 km au nord de sa position climatologique.
2. Inversement, quelle est la réponse atmosphérique à des modifications de la circulation océanique (anomalies de SST extra tropicales par exemple) ? On cherchera à évaluer dans quelle mesure cette réponse atmosphérique est linéaire, ou non-linéaire due aux modifications de circulation transitoire. On peut se demander si l'approche précédente est satisfaisante et réaliste, ou si on doit nécessairement considérer le système couplé et s'intéresser plutôt à la réponse atmosphérique à des anomalies de transport méridien de chaleur dans l'océan Atlantique Nord. Ces deux approches seront comparées dans le cadre d'un modèle couplé simplifié et de résolution intermédiaire, forcé par des anomalies prescrites ou paramétrisées de transport de chaleur.
3. On cherchera en parallèle à déterminer les modes de variabilité naturelle grande échelle du système climatique et de comprendre leur mécanisme. Nous développons une approche physique testée sur des modèles de complexité croissante qui permettent l'identification des mécanismes d'excitation de ces modes. Notre objectif est ici de documenter les modes de variabilité de l'océan et du système couplé océan-atmosphère-glace sur des périodes interannuelles à interdécennales, voire plus longues, pour les comparer aux observations et aux modèles les plus réalistes. Notre démarche consiste à chercher des mécanismes conceptuels

'simples' et à les tester dans des configurations de plus en plus réalistes, jusqu'à pouvoir les comparer aux observations. Les interactions océan-atmosphère simplifiées utilisées ici sont validées en fonction des résultats des deux parties précédentes. Notre approche se justifie par la difficulté de comprendre ou interpréter les modes de variabilité observés ou modélisés par les systèmes couplés réalistes. Connaissant la signature des modes recherchés, peut-être est-il plus aisé de déterminer lesquels s'expriment dans les observations ou les simulations réalistes et couplées !

II. Bilan 2004

1. Réponse océanique à la variabilité du forçage atmosphérique et variations du Gulf Stream

a. Modèles océaniques réalistes forcés (CF, GdC)

Nous avons continué notre analyse du comportement du Gulf Stream dans 5 modèles forcés par les données NCEP, analyse qui avait été commencée dans le cadre du projet PREDICATE. Nos travaux (de Coëtlogon et al., en préparation) démontrent qu'une NAO positive (négative) entraîne un déplacement vers le nord (sud) et une intensification (diminution) du transport du Gulf Stream. D'autre part, la variabilité observée et simulée du Gulf Stream est liée dans la plupart des modèles à la variabilité de la circulation Atlantique méridienne moyenne.

Ce lien entre variabilité du Gulf Stream et THC sera étudié plus en détail en 2005 mais cherchera plus précisément à établir s'il y a un lien entre les flux d'eau douce et de chaleur dans la gyre subpolaire en amont et les fluctuations de la position du Gulf Stream en aval : **ce volet de nos travaux sera donc présenté dans le projet Salinité et THC (G. Reverdin) du PNEDC en 2005.**

b. Modèle de Parsons-Veronis (JS)

On se propose ici d'étudier certains aspects de la réponse du Gulf-Stream à la variabilité atmosphérique associée à l'Oscillation Nord Atlantique. En effet, on sait que ce courant subit des déplacements nord sud d'une centaine de kilomètres, sur une zone allant de la côte américaine jusqu'à 2000 kilomètres de celle-ci, et sur des durées allant de la saison jusqu'à la décennie. Ces déplacements ne sont pas clairement établis à l'échelle de la saison mais apparaissent nettement à plus longue échelle de temps comme les résultats de Frankignoul et al. (2001) l'indiquent, un indice de NAO élevé favorisant un chemin plus au Nord entre 1 et 3 ans plus tard.

On a donc étudié, à partir du modèle de Parsons (1969) étendu au cas non stationnaire, quels déplacements ce modèle prévoyait et avec quelles échelles de temps. On a ainsi pu montrer qu'une période de NAO positive était bien associée, comme espéré, un déplacement vers le nord, d'ordre de grandeur très comparable aux observations. Ce bon accord se dégrade lorsqu'on analyse l'évolution du modèle dans le temps. En effet, la réponse présente un maximum de variance lorsqu'elle est en phase avec le vent. Cela est bien une caractéristique des OGCMs étudiés par G. de Coëtlogon et al. (2005, communication personnelle), OGCMs de résolution modérée et qui donc ne représentent pas les tourbillons. Par contre, cela n'apparaît pas dans les observations (Frankignoul et al., 2001). Un second pic de variance apparaît dans notre modèle lorsque la réponse est en retard de 2-3 ans sur le vent mais elle reste significative sur tout l'intervalle de temps allant de 0 à 5 ans. Les observations montrent plutôt un pic autour de 12-18 mois même s'il semble que des corrélations significatives puissent être observées jusqu'à 9 ans, et les modèles une variance élevée entre 0 et 3 ans et demi. Notre modèle privilégie donc des retards autour de 4-5 ans, ce qui n'est pas surprenant puisque l'énergie qu'apporte le vent ne peut se projeter que sur le premier mode barocline sans que les autres modes interviennent. Il est donc naturel que l'échelle de temps associée ressorte.

Les résultats obtenus semblent indiquer que le mécanisme "d'affleurement" participe au détachement et aux déplacements du Gulf Stream, même s'il est insuffisant puisque l'accord avec les observations est imparfait.

Publication : Sirven, J., 2005: Response of the separated western boundary current to harmonic and stochastic wind stress variations in a 1.5 layer ocean model. *J. Phys. Oceanogr.*, in press.

c. Interprétation de la variabilité interannuelle du niveau de la mer dans l'Atlantique Nord (CC, ACdV, TH)

À l'aide de modèles océaniques simplifiés, on s'est attaché à reproduire les variations du niveau de la mer résultant des variations du forçage atmosphérique (vent, flux de chaleur et d'eau douce) sur la période d'observation altimétrique par Topex-Poseidon. Aux échelles interannuelles, les variations des échanges de chaleur avec l'atmosphère influencent principalement les variations du niveau de la mer (effet stérique). Une reproduction satisfaisante des observations est obtenue dans une grande partie de l'Atlantique aux moyennes latitudes. Les anomalies de vent sont également importantes : l'ajustement de l'océan met en jeu la propagation d'ondes de Rossby barotrope et baroclines, et peut être aisément calculé à partir de modèles unidimensionnels en modes verticaux. Le mode barotrope est prédominant autour de 50°N, alors que le premier mode barocline domine à des latitudes plus variées, de 10°N à 40°N. Une combinaison du mode barotrope, ajusté instantanément à ces échelles de temps, et du premier mode barocline, reproduit les observations de manière satisfaisante dans une grande partie de l'Atlantique.

Néanmoins le modèle reste trop simple pour reproduire précisément les variations du niveau de la mer : l'addition des signaux liés à chaque forçage ne permet pas d'améliorer les corrélations avec les observations. Superposant différents signaux (stériques, modes verticaux) d'origines diverses et indépendantes, le niveau de la mer n'est pas une variable simple à prédire. La difficulté de rationaliser la vitesse de propagation des anomalies observées en est la preuve. Le bassin atlantique est d'autant moins adapté par la relative proximité de côtes dans toutes les directions.

Finalement, afin de prendre en compte dans un cadre cohérent le forçage par le vent et par les flux de chaleur, un modèle océanique plus sophistiqué a été développé. La propagation des anomalies de température dues aux anomalies de flux de chaleur est alors mieux représentée.

Une publication est bientôt finalisée : Cabanes, C., A. Colin de Verdière, and T. Huck, 2005: Contributions of wind forcing and surface heating to interannual sea level variations in the Atlantic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, in preparation.

d. Ajustement de la circulation océanique : ondes de Rossby baroclines en présence d'un écoulement moyen (ACdV, en collaboration avec R. Tailleux)

La dynamique des ondes longues de Rossby en présence d'un écoulement moyen barocline a été étudiée et on a montré l'importance de la courbure U_{zz} du profil du courant moyen grâce à une combinaison de solutions analytiques et numériques du problème aux valeurs propres. Aux basses latitudes, la vitesse de phase du premier mode barocline est légèrement réduite par l'écoulement moyen par rapport à la théorie classique. Entre 30 et 40° de latitude, la vitesse de phase vers l'ouest peut augmenter significativement, jusqu'à un facteur 2. Aux plus hautes latitudes, une transition critique ne permet plus d'obtenir des modes de Rossby discrets, ce qui pourrait expliquer l'absence d'observation de propagation zonale aux latitudes supérieures à 50°.

Publication : Colin de Verdière, A., and R. Tailleux, 2005: The interaction of a baroclinic mean flow with long Rossby waves. *J. Phys. Oceanogr.*, in press.

2. Réponse atmosphérique à la variabilité océanique : Influence de la circulation océanique sur la NAO via les anomalies de transport méridien de chaleur (FDA)

Pendant cette deuxième année on a utilisé le modèle (QG + « slab ocean ») développé en 2003 pour étudier la dynamique de la NAO et l'influence que la circulation océanique peut avoir sur celle-ci. En particulier on a étudié quel est l'impact sur la NAO si on la couple seulement avec la circulation poussée par les vents (et on ne considère pas les autres effets comme la circulation thermohaline ou les variabilités internes de l'océan). Pour cela on a construit une paramétrisation de l'anomalie de transport de chaleur océanique en utilisant la technique de l'oscillateur retardé. On peut penser que longues périodes de NAO positive peut causer, à l'échelle décennale, une augmentation de l'intensité de la circulation poussée par les vents, augmentant par conséquent le transport de chaleur vers le nord dans l'océan. Cet effet peut être représenté par une structure d'anomalie de flux de chaleur de surface, multipliée par un coefficient proportionnel à l'indice NAO intégré dans le temps sur une dizaine d'années précédentes. Ces dix ans constituent le « retard » du bassin à répondre à une variation de forçage dû aux vents.

Avec une telle paramétrisation, on a observé deux types de réponse dans l'atmosphère. A l'échelle de temps très longue (plus de 25 ans de période), on observe une réduction de variabilité de la NAO. A l'échelle décennale, par contre, on obtient une faible mais observable oscillation entre les deux phases de la NAO et dans le dipôle de SST qui lui est lié.

La conclusion qui est suggérée par ces résultats est que l'interaction entre la NAO et la circulation poussée par les vents peut seulement réduire l'énergie de la NAO aux très basses fréquences. Le fait que cette diminution n'est pas vraiment observée dans les données suggère qu'un autre mécanisme doit entrer en jeu. Un candidat est la circulation thermohaline. A l'échelle décennale, par contre, ces résultats proposent un mécanisme pour expliquer l'oscillation décennale que l'on observe dans les champs observés de SST. Ce mécanisme se base sur la dynamique de l'oscillateur retardé, où la périodicité de dix ans est donnée par le paramètre de « retard », à son tour lié aux temps d'ajustement de l'océan à un changement du forçage dû au vent. L'explication plus courante de cette oscillation est celle de la résonance advective (Saravanan and McWilliams 1998), celle-ci constitue une alternative.

Ces résultats ont été soumis pour publication : D'Andrea, F., A. Czaja, J. Marshall 2004: "Impact of anomalous ocean heat transport on the North Atlantic Oscillation" submitted to Journal of Climate.

3. Modes de variabilité naturelle de l'océan et du système couplé

On cherche ici à déterminer et à comprendre les modes de la circulation océanique dans une hiérarchie de modèles océaniques de complexité croissante : modèles quasi-géostrophiques (barotropes puis baroclines), shallow-water, planétaires géostrophiques et enfin aux équations primitives. On peut distinguer fondamentalement plusieurs méthodes pour y parvenir : l'intégration temporelle de ces modèles afin de déterminer les modes instables qui se développent spontanément (*c, d, e*), l'analyse de stabilité linéaire qui détermine les valeurs et vecteurs propres du modèle linéarisé autour d'un équilibre et qui permet d'accéder à des modes éventuellement amortis (*a, b*), ou l'analyse de stabilité généralisée qui permet de chercher les perturbations dont la croissance maximale sur un temps fini (*b*). La mise en relation de ces diverses solutions pour des modèles de complexité croissante, les plus simples étant abordables analytiquement alors que très rapidement les solutions numériques sont inévitables, a permis de bien comprendre l'origine des modes interdécennaux de la circulation thermohaline. On a aussi pu montrer que l'influence de la salinité et du couplage semble rester limitée sur ce mode thermique. Cette dernière année devrait permettre finalement d'appliquer ces méthodes à une circulation océanique globale réaliste.

a. Théorie des modes de bassin océaniques (MBJ, TH)

Après la démonstration de l'intérêt de la méthode dans un modèle quasigéostrophique barotrope (Ben Jelloul et Huck 2003), le spectre des modes de bassin baroclines a été étudié dans un modèle QG 2 couches forcé par le vent, en exploitant l'hypothèse de grande échelle qui nous permet de conduire un développement multi-échelle faiblement nonlinéaire en nombre de Burger (Ben Jelloul et Huck 2004, révisé). Les modes de bassin baroclines sont alors advectés par la circulation de Sverdrup barotrope stationnaire (en découplant les modes barotrope et barocline, on se ramène en fait à un modèle à une couche et demie). Nous favorisons la régularisation des solutions par la dispersion plutôt que par la dissipation (Spydell et Cessi 2003). Pour les plus grandes échelles spatiales (bassin), considérablement plus grandes que le rayon de Rossby, tous les modes sont neutres. On examine alors leur typologie et leurs caractéristiques fréquentielles et spatiales. Trois types de modes existent pour des vents suffisamment forts pour produire un tourbillon de recirculation avec des contours géostrophiques fermés : les modes de bassin classiques de Rossby mais déformés par les courants moyens qui les excluent de la zone de recirculation, des modes stationnaires et oscillatoires principalement piégés dans les contours géostrophiques fermés. Ces derniers apparaissent aux plus basses fréquences pour un tourbillon de recirculation modéré, mais pour des tourbillons barotropes plus intenses, ils se déplacent à plus haute fréquence et résonent avec les modes de Rossby.

Publication : Ben Jelloul, M., and T. Huck, 2004: Baroclinic basin modes in a two-layer quasigeostrophic model. *J. Phys. Oceanogr.*, revised.

b. Analyse de stabilité de la circulation générale océanique : préliminaires méthodologiques (FS, MBJ, TH)

Dans le cadre de la thèse de Florian Sévellec au LPO, on cherche à déterminer la signature des modes de variabilité océanique dans une configuration réaliste par analyse de stabilité linéaire et généralisée (Farrell et Ioannou 1996). Pour ce faire, la configuration globale ORCA2 du modèle OPA a été choisie pour étendre la méthode utilisée par Jérôme Vialard dans le Pacifique tropical (Moore et al. 2003), à l'aide des modèles linéaire tangent et adjoint. Un travail préliminaire à la mise en oeuvre de cette méthode a été de la tester dans un modèle océanique simplifié, bidimensionnel en moyenne zonale, où la matrice linéaire tangente peut être facilement obtenue et manipulée. Une première étape s'est attachée à bien comprendre les modes linéaires de ce modèle afin d'aider à l'interprétation des perturbations optimales. On a alors cherché à déterminer les perturbations optimales permettant la croissance en temps fini de divers diagnostics (transport de chaleur, différentes normes des perturbations). En supposant que l'océan peut être forcé par un bruit atmosphérique, on peut déterminer également la structure spatiale des optimaux stochastiques. Ces travaux seront rédigés comme extension des résultats de Tziperman et Ioannou (2002). En parallèle s'est effectuée la prise en main du modèle OPA ORCA2 et 2 simulations ont été intégrées afin d'obtenir un état d'équilibre sous forçage climatologique annuel moyen (pour analyse de stabilité linéaire) et un cycle saisonnier répété (pour analyse de stabilité généralisée).

Publication : Sévellec, F., T. Huck, and M. Ben Jelloul, 2004: On the mechanism of centennial thermohaline oscillations. *J. Mar. Res.*, submitted.

c. Rôle de la salinité dans la variabilité thermohaline

Des oscillations décennales à interdécennales apparaissent spontanément dans les modèles de circulation générale océanique plus ou moins idéalisés forcés par des flux de chaleur et/ou d'eau douce constants, ou par des conditions mixtes (rappel des températures de surface mais flux d'eau douce constants). Nous avons pu montrer qu'elles résultent de deux types de mécanismes distincts

et nous mettons en évidence plusieurs manières de les distinguer (Arzel et al. 2004, soumis). Nous avons comparé la variabilité interdécennale sous forçage de type flux constant et de type mixte dans un modèle océanique basse résolution idéalisé (planétaire géostrophique) dans une configuration d'un seul bassin unihémisphérique à fond plat. Une analyse des bilans de variance montre que la source d'énergie alimentant les perturbations diffère fondamentalement : en flux constant, ce sont les flux méridiens turbulents de chaleur dans la région du courant de bord ouest qui entretiennent les oscillations (Colin de Verdière et Huck 1999, ou instabilité barocline généralisée, suivant te Raa et Dijkstra 2002) ; alors qu'en conditions mixtes, c'est la combinaison des corrélations positives entre les anomalies de température (donc des flux de chaleur) et de salinité, associées à l'ajustement convectif.

Ces caractéristiques fondamentales devraient fournir des critères objectifs pour permettre d'identifier les mécanismes à l'oeuvre dans des simulations plus réalistes (avec topographie, tourbillons mésoéchelles) et/ou couplées (ou forçage stochastique).

Publication : Arzel, O., T. Huck and A. Colin de Verdière, 2004: Distinguishing two types of thermohaline circulation interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.

d. Modélisation couplée intermédiaire (OA,ACdV,TH)

Un modèle atmosphérique (axisymétrique) en moyenne zonale a été développé, ajusté, documenté et validé ; des paramétrisations des tourbillons (type Green 1970) ont été utilisées afin d'obtenir une climatologie correcte. Cet outil permet de s'affranchir du choix délicat entre flux constant ou relaxation pour forcer un modèle océanique, aussi nous n'essaierons pas de l'ajuster plus précisément. Il a été couplé au modèle océanique planétaire géostrophique pour différentes configurations d'un bassin à fond plat : bihémisphérique symétrique puis avec courant antarctique. La variabilité interdécennale est omniprésente avec des périodes O(20 ans) dépendant sensiblement du schéma radiatif utilisé, mais parfois amortie sur des périodes de quelques centaines à quelques milliers d'années. Finalement, il apparaît que le mode de variabilité fondamental dans la dernière configuration ressemble au mode thermique précédemment étudié en flux constant dans l'hémisphère nord, avec une signature quasiment inexistante dans l'hémisphère sud, mais il est amorti en quelques milliers d'années dans la plupart des cas (Arzel 2004).

Ces résultats sont en cours de rédaction pour une publication : Arzel, O., T. Huck and A. Colin de Verdière, 2005: Interdecadal variability in a coupled model of intermediate complexity. *J. Clim.*, in preparation.

e. Interactions basse-fréquence océan-atmosphère dans l'océan austral (GM,ACdV,FDA)

La littérature scientifique depuis une vingtaine d'années, fait état de l'existence de schémas climatologiques récurrents de grandes échelles. Ces distributions particulières, ont pour certaines une variabilité interannuelle dont l'origine et les mécanismes peuvent être encore mal connus. A partir du formalisme quasi-géostrophique nous nous proposons d'aider à la compréhension d'un de ces schémas de variabilité située dans l'hémisphère sud : l'onde circumpolaire antarctique (OCA).

La majeure partie de l'année 2004 a été consacrée à l'étude des simulations numériques dans lesquelles nous avons trouvé un mécanisme donnant naissance à un mode de variabilité du type de l'OCA. Cette variabilité océanique s'observe dans les simulations où l'océan et l'atmosphère sont couplés. Nous avons également étudié les réponses transitoire et stationnaire atmosphériques à des anomalies de SST. La réponse stationnaire induit une rétroaction positive sur les anomalies de SST. Cette rétroaction est observée en comparant la simulation couplée avec celle où la SST est forcée par l'atmosphère sans rétroagir sur celle-ci. La simulation couplée exhibe des anomalies de SST plus fortes et plus persistantes : c'est la manifestation de la rétroaction positive mentionnée ci-dessus. La fin de l'année 2004 a été consacrée à la préparation du congrès automnal de l'AGU à

San Francisco et à la présentation du travail au MIT à Boston.

L'année 2005 sera consacrée à la rédaction d'une publication sur les résultats de l'année 2004. Elle sera également consacrée à de nouvelles expériences sur la sensibilité du système climatique à des perturbations de l'ACC et à des anomalies de flux de chaleur dans les courants de bords ouest. Nous espérons également pouvoir étudier la transposition des résonances observées dans des modèles linaires simples à notre modèle contenant les transitoires baroclines.

Ce travail de thèse de Guillaume Maze, coencadré par Alain Colin de Verdière et Fabio d'Andrea, a été rattaché à ce projet non par son adéquation géographique mais par sa similarité méthodologique (surtout vue l'implication de chacun des 2 encadrants dans un autre projet du PNEDC, respectivement interannuel et THC).

III. Plan de recherche pour 2005

On s'est attaché pour cette dernière année à finaliser les questions posées au cours de l'évolution du projet. Il n'y a pas de problématique nouvelle mais uniquement les actions qui permettront de conclure sur les travaux en cours.

1. Réponse océanique à la variabilité du forçage atmosphérique

Cette partie est désormais intégralement dans le thème **THC et salinité** coordonné par Gilles Reverdin et Alain Colin de Verdière. Les chercheurs associés ne font plus partie de l'équipe pour 2005.

2. Réponse atmosphérique à la variabilité océanique: Influence de la circulation océanique sur la NAO via les anomalies de transport méridien de chaleur (FDA)

Les résultats obtenus avec le modèle couplé simple et la paramétrisation des anomalies de flux de chaleur océanique nous encouragent à essayer d'y inclure d'autres processus dynamiques.

Une extension naturelle du travail est d'intégrer dans la paramétrisation une représentation de l'effet de la circulation thermohaline (THC), à ajouter à l'effet de la circulation poussée par les vents déjà présent. Pour cela, le choix de la structure spatiale du flux de chaleur que la variabilité de la THC engendre devient crucial. Si ce pattern, comme le suggèrent Marshall et al. (2001) est un dipôle dans l'océan atlantique nord, on pourrait s'attendre à une ultérieure diminution d'énergie de la NAO. Si par contre, comme le suggèrent Delworth and Mann (2000) il s'agit d'une structure monopolaire à l'échelle du bassin, la THC pourrait donner de l'énergie à la NAO. On pourra essayer différents choix du pattern de flux, ainsi que de paramètre de retard dans le schéma de l'oscillateur retardé, et en estimer l'effet sur la dynamique de la NAO aux différentes échelles de temps.

Un autre développement possible regarde l'application de la paramétrisation des anomalies de flux de chaleur océanique à l'océan Pacifique, seul et/ou en combinaison avec l'océan Atlantique. Les flux de chaleur anormaux dans les deux bassins pourraient créer une réponse sur le même mode atmosphérique : le mode annulaire. L'importance comparative des deux bassins pourra être estimée, ainsi que le meilleur choix des paramètres du schéma de l'oscillateur retardé.

Ces travaux seront faits en continuant la collaboration avec Arnaud Czaja et John Marshall au MIT.

3. Modes de variabilité naturelle de l'océan et du système couplé

a. Théorie des modes de bassin océanique (MBJ, TH)

La dernière étape pour relier les modes de bassin obtenus en dynamique simplifiée, quasigéostrophique, toujours amortis (Ben Jelloul et Huck, 2003, 2004), et ceux obtenus en dynamique planétaire géostrophique, éventuellement instables (Huck et Vallis 2001), est la prise en compte de 2 couches actives permettant une instabilité barocline grande échelle. Cette étape a été ébauchée en dynamique shallow-water et semble effectivement fondamentale. Il reste à la reproduire dans la dynamique quasigéostrophique pour étendre les résultats précédents et mettre au propre les résultats en shallow-water, on aura alors établi la relation continue des modes de bassin traditionnels 2D (i.e. QG, Pedlosky 1979, Cessi et Primeau 2001) jusqu'aux modes de bassin instables 3D obtenus pour la circulation thermohaline.

Vu que toutes les analyses précédentes comportaient un fond plat, on se propose d'étendre l'analyse des modes de bassins (modes de Rossby et/ou modes instables) linéaires dans un modèle quasigéostrophique à plusieurs couches d'une circulation poussée par les vents en présence de topographie pouvant coupler les structures barotropes et baroclines. L'étude séparée des différentes configurations devrait nous permettre d'analyser leurs impacts sur la structure, les fréquences et la stabilité des modes afin, entre autres, de les comparer aux différentes "théories" proposées pour expliquer les vitesses de propagation anormales observées par Chelton et Schlax (1996).

b. Stabilité de la circulation générale océanique (FS, MBJ, TH, ACdV, LtR)

A l'inverse de la partie précédente plus attachée à la compréhension des mécanismes physiques de variabilité, on cherche ici à déterminer la structure des modes de bassin dans une configuration globale réaliste de la circulation océanique grande échelle. L'outil choisi dans le cadre de la thèse de Florian Sévellec, en collaboration avec Jérôme Vialard, est la configuration ORCA2 d'OPA pour la mise au point récente de son modèle linéaire tangent et adjoint. Le travail peut se décomposer en 2 volets principaux, comme dans le cas du Pacifique tropical (Moore et al. 2003) : une analyse de stabilité linéaire, qui nécessite un état d'équilibre, et une analyse de stabilité généralisée. Après les essais concluants de la méthode dans des modèles simplifiés (2DV et planétaires géostrophiques), l'année 2005 devrait voir les premiers résultats concrets.

Un certain nombre de questions restent ouvertes sur la mise en oeuvre de la méthode en présence d'un cycle saisonnier, et pour restreindre les solutions à des sous-domaines du modèle (Atlantique Nord) : l'état d'avancement du projet devrait permettre de s'intéresser à ces questions fondamentales dans le cadre du séjour postdoctoral de Lianke te Raa (IMAU, Utrecht) au LPO au printemps. Dans le cadre du problème généralisé, une réflexion approfondie sur la définition des diagnostics à optimiser dans le cadre de la circulation générale (transport de chaleur...) et des contraintes sur les perturbations optimales (normes) est actuellement menée dans les modèles 2DV et planétaires géostrophiques 3D.

IV. Références citées dans le texte

- Arzel, O., 2004: Mécanismes de variabilité climatique interdécennale dans des modèles idéalisés. Ph.D. thesis manuscript, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 240pp.
- Cessi, P., and F. Primeau, 2001: Dissipative selection of low frequency modes in a reduced-gravity basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 127-137.
- Chelton, D. B., and M. G. Schlax, 1996: Global observations of oceanic Rossby waves. *Science*, **272**, 234-

- Colin de Verdière, A., and T. Huck, 1999: Baroclinic instability: an oceanic wavemaker for interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 893-910.
- de Coëtlogon, G. and C. Frankignoul, 2003: On the persistence of winter sea surface temperature in the North Atlantic. *J. Climate*, **16**, 1364-1377.
- Delworth, T. L., and R. J. Greatbatch, 2000: Multidecadal thermohaline circulation variability driven by atmospheric surface flux forcing. *J. Climate*, **13**, 1481-1495.
- Delworth, T. L., and M. E. Mann, 2000: Observed and simulated multidecadal variability in the North Atlantic. *Clim. Dyn.*, **16**, 661-676.
- Farrell, B. F., and P. J. Ioannou, 1996: Generalized stability theory. Part I: Autonomous operators. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2025-2040.
- Frankignoul, C., G. de Coëtlogon, T.M. Joyce and S. Dong, 2001: Gulf Stream variability and ocean-atmosphere interactions. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 3516-3529.
- Green, J. S. A., 1970: Transfer properties of the large-scale eddies and the general circulation of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **96**, 157-185.
- Huck, T., and G. K. Vallis, 2001: Linear stability analysis of the three-dimensional thermally-driven ocean circulation: application to interdecadal oscillations. *Tellus*, **53A**, 526-545.
- Mann, M. E., R. S. Bradley, and M. K. Hughes, 1998: Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, **392**, 779-787.
- Marshall, J., H. Johnson, and J. Goodman, 2001: A study of the interaction of the North Atlantic oscillation with ocean circulation. *J. Climate*, **14**, 1399-1421.
- Marshall, J., Y. Kushnir, D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, J. Hurrell, M. McCartney, R. Saravanan and M. Visbeck, 2001: North Atlantic Climate Variability: Phenomena, impacts and mechanisms. *Int. J. Climate*, **21**, 1863-1898.
- Moore, A. M., J. Vialard, A. T. Weaver, D. L. T. Anderson, R. Kleeman and J. R. Johnson, 2003: The role of air-sea interaction in controlling the optimal perturbations of low-frequency tropical coupled ocean-atmosphere modes. *J. Climate*, **16**, 951-968.
- Parsons, A. T., 1969: A two-layer model of Gulf Stream separation. *J. Fluid Mech.*, **39** (part 3), 511-528.
- Pedlosky, J., 1979: *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, New York, 624 pp.
- Rodwell, M.J., D.P. Rowell, and C.K. Folland, 1999: Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, **398**, 320-323.
- Saravanan, R., and J. C. McWilliams, 1998: Advective ocean-atmosphere interaction: An analytical stochastic model with implications for decadal variability. *J. Clim.*, **11**, 165-188.
- Spydell, M., and P. Cessi, 2003: Baroclinic modes in a two-layer basin. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 610-622.
- te Raa, L. A., and H. A. Dijkstra, 2002: Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal time scales. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 138-160.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'ÉQUIPE

- Arzel, O., 2004: Mécanismes de variabilité climatique interdécennale dans des modèles idéalisés. Ph.D. thesis manuscript, Université de Bretagne Occidentale, Brest, France, 240pp.
- Arzel, O., and T. Huck, 2003: Decadal oscillations in a simplified coupled model due to unstable interactions between zonal winds and ocean gyres. *Dyn. Atmos. Oceans*, **37**, 245-270.
- Arzel, O., T. Huck and A. Colin de Verdière, 2004: Distinguishing two types of thermohaline circulation interdecadal variability. *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.
- Arzel, O., T. Huck and A. Colin de Verdière, 2005: Interdecadal variability in a coupled model of intermediate complexity. *J. Clim.*, in preparation.
- Ben Jelloul, M., and T. Huck, 2003: Basin modes interactions and selection by the mean flow in a reduced-gravity quasigeostrophic model. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 2320-2332.
- Ben Jelloul, M., and T. Huck, 2004: Baroclinic basin modes in a two-layer quasigeostrophic model. *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.
- Cabanes, C., A. Colin de Verdière, and T. Huck, 2005: Contributions of wind forcing and surface heating to interannual sea level variations in the Atlantic Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, in preparation.
- Colin de Verdière, A., and M. L. Blanc, 2001: Thermal resonance of the atmosphere to SST anomalies. Implications for the Antarctic circumpolar wave. *Tellus*, **53A**, 403-424.
- Colin de Verdière, A., and R. Tailleux, 2005: The interaction of a baroclinic mean flow with long Rossby waves. *J. Phys. Oceanogr.*, in press.
- Conil, S., and Z.X. Li, 2002: Influence of the North Atlantic on simulated atmospheric variability. to appear in *Annali di Geofisica*, SINTEX journal special issue.
- Costa, E. D., and A. Colin de Verdière, 2002: The 7.7-year North Atlantic Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 581A, 797-818.
- Czaja, A. and C. Frankignoul, 2002: Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, **15**, 606-623.
- Czaja, A., A. W. Robertson, and T. Huck, 2002: The role of Atlantic ocean-atmosphere coupling in affecting North Atlantic Oscillation variability. In: *The North Atlantic Oscillation: climatic significance and environmental impact*, J. W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen, and M. Visbeck Eds., AGU Geophysical Monograph Series, Vol. 134, 147-172.
- D'Andrea, F., R. Vautard, 2001: Extratropical low-frequency variability as a low dimensional problem. Part I: a simplified model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1357-1375.
- D'Andrea, F., 2002 : Extratropical low-frequency variability as a low dimensional problem. Part II: stationarity and stability of large scale equilibria. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **128**, 1059-1073.
- D'Andrea, F., A. Czaja, and J. Marshall, 2005: Impact of anomalous ocean heat transport on the North Atlantic Oscillation. *J. Clim.*, submitted.
- de Coëtlogon, G. and C. Frankignoul, 2003: On the persistence of winter sea surface temperature in the North Atlantic. *J. Climate*, **16**, 1364-1377.

- Deshayes, J. and C. Frankignoul, 2005: Spectral characteristics of the response of the meridional overturning circulation to deep water formation. *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.
- Ferreira, D., C. Frankignoul and J. Marshall, 2001: Coupled ocean-atmosphere dynamics in a simple midlatitude climate model. *J. Climate*, **14**, 3704-3723.
- Frankignoul, C., G. de Coëtlogon, T.M. Joyce and S. Dong, 2001 : Gulf Stream variability and ocean-atmosphere interactions. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 3516-3529.
- Frankignoul, C. and E. Kestenare, 2002 : The surface heat flux feedback. Part 1: Estimates from observations in the Atlantic and the North Pacific. *Clim. Dyn.*, **19**, 633-647.
- Frankignoul, C., E. Kestenare and J. Mignot, 2002 : The surface heat flux feedback. Part 2: Direct and indirect estimates in the ECHAM4/OPA8 coupled GCM. *Clim. Dyn.*, **19**, 649-655.
- Frankignoul C, Friederichs P, Kestenare E., 2002b : Influence of Atlantic SST anomalies on the atmospheric circulation in the Atlantic_European sector. *Annals of Geophysics*, in press.
- Herbaut C., J. Sirven and A. Czaja, 2001: An idealized model study of the mass and heat transports between the subpolar and the subtropical gyres. *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 2903-2916.
- Herbaut C., J. Sirven and S. Février, 2002: Response of a simplified oceanic general circulation model to idealized NAO-like stochastic forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 3182-3192.
- Houssais, M-N., and C. Herbaut, 2002: Variability of the ice export through Fram Strait in 1993-98 : the winter 1994-95 anomaly. *Polar Research*, submitted.
- Huck, T., G. K. Vallis et A. Colin de Verdière, 2001 : On the robustness of the interdecadal modes of the thermohaline circulation. *J. Climate*, **14**, 940-963.
- Huck, T., G. K. Vallis, 2001: The use of tangent linear model for predicting oscillations of the three-dimensional thermohaline circulation. *Tellus*, **53A**, 526-545.
- Mignot, J. and C. Frankignoul, 2003: On the interannual variability of surface salinity in the Atlantic. *Clim. Dyn.*, **20**, 555-565.
- Mignot, J. and C. Frankignoul, 2004: Interannual to interdecadal variability of sea surface salinity in the Atlantic and its link to the atmosphere in a coupled model. *J. Geophys. Res.*, **109**, C04005.
- Mignot, J. and C. Frankignoul, 2005: On the variability of the Atlantic meridional overturning circulation, the North Atlantic Oscillation and the El Nino Southern Oscillation in the Bergen Climate Model. *J. Climate*, submitted.
- Reverdin, G., E. Kestenare, C. Frankignoul and T. Delcroix, 2005: In situ surface salinity in the tropical and subtropical Atlantic Ocean. Part 1: Large scale variability. *Climate Dynamics*, submitted.
- Sévellec, F., T. Huck, and M. Ben Jelloul, 2004: On the mechanism of centennial thermohaline oscillations. *J. Mar. Res.*, submitted.
- Sirven, J., C. Frankignoul, G. de Coëtlogon and V. Taillandier, 2002 : On the spectrum of wind-driven baroclinic fluctuations of the ocean in the midlatitudes. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2405-2417.
- Sirven, J., 2005: Response of the separated western boundary current to harmonic and stochastic wind stress variations in a 1.5 layer ocean model. *J. Phys. Oceanography*, in press.

MOYENS DONT DISPOSE LE PROPOSANT ET QUI SERONT AFFECTÉS À LA RÉALISATION DU PROJET

1. Chercheurs et laboratoires impliqués

NOM	LABORATOIRE	FONCTION	Participation au projet	
			participation	Expertise
Fabio d'Andrea	LMD	CR1 CNRS	40%	
Mahdi Ben Jelloul	LPO	MdC UBO	50%	
Alain Colin de Verdière	LPO	Professeur UBO	30%	
Thierry Huck	LPO	CR1 CNRS	50%	
Guillaume Maze	LPO	Doctorant UBO	100%	
Florian Sévellec	LPO	Doctorant UBO	100%	
Jérôme Vialard	LODYC	CR IRD		OPA tangent adjoint
Olivier Arzel	UCL, Louvain	postdoc	25%	
Cécile Cabanes	JPL, Pasadena	Postdoc	25%	
Lianke te Raaij	IMAU, Utrecht	Postdoc	30%	
Total : 14	5		450%	

2. Equipement disponible pour la réalisation du projet (préciser dans quel laboratoire)

- LMD, LODYC, LPO : stations de travail Sun/unix et PC/linux
- heures de calcul NEC à l'IDRIS (LPO: 1000h)
- heures de calcul à IFREMER sur Compaq Alpha Server (LPO)

Aucun autre financement attribué ou demandé dans le cadre des programmes INSU ou européen.

BUDGET

1. FONCTIONNEMENT : 3000euro

LPO : 3000 euro (2 publications AMS)

2. MISSIONS : 7600 euros

LMD : 1600 euro (2 missions à Brest, 1 mission à Toulouse)

LPO : 6000 euro (1 mission Utrecht-Brest et partie du séjour, 3 missions Brest-Paris, 1 participation EGU 2004, 1 participation école d'été)

3. ÉQUIPEMENT SPÉCIFIQUE : 4000 euro

LMD : 2000 euro (station de travail)

LPO : 2000 euro (station de travail)

	<i>LMD D'Andrea</i>	<i>LPO Huck</i>	<i>TOTAL</i>
<i>Chercheurs (%)</i>	40	410	450
Fonctionnement	0	3000	3000
Missions	1600	6000	7600
Équipement	2000	2000	4000
TOTAL (euro)	3600	11000	14600

TOTAL GÉNÉRAL DES CRÉDITS DEMANDÉS (HT) : 14600 euro